Il mondo programmabile delle stampanti 4D

Le Scienze

Febbraio 2015

€ 4,50

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

L'eredità di Fukushima

Quattro anni dopo l'incidente si cominciano a chiarire gli effetti delle radiazioni su organismi ed ecosistemi

Astronomia

A caccia di fossili di galassie per scoprire il passato della Via Lattea

Clima

I fenomeni atmosferici estremi potrebbero diventare la norma

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA RIVISTA MENSILE - NUMERO 558

9 770036 808000 50558

Pink Lady®

LA MELA CHE COLTIVA I SUOI VALORI

Portata in Italia dallo slancio collettivo di produttori appassionati, la mela Pink Lady® è l'avventura di donne e uomini riuniti in un'associazione senza scopo di lucro e legati dagli stessi valori. Rispetto del lavoro dell'uomo. Rispetto del tempo. Rispetto della terra. Questi valori sono alla base di tutte le scelte e di tutte le azioni e costituiscono il terreno fertile dal quale nasce una mela straordinaria.

molto più di una mela

PROTEINES® ©Immagine : Eiko Ojala • Il marchio Pink Lady® è usato per la commercializzazione della varietà Cripps Pink (C.O.V.)

COLTIVARE L'ESPERIENZA DELL'UOMO

Nata dall'attento lavoro dell'uomo, la mela Pink Lady® è il frutto di una minuziosa produzione e di un progetto collettivo, basato su solidi valori: giusta condivisione del valore economico, trasmissione del sapere tradizionale, filosofia comune di progresso... Una produzione di eccellenza e un modello di sviluppo virtuoso in cui i valori umani crescono giorno dopo giorno.

- Associazione senza scopo di lucro
- Produttori pienamente coinvolti nella governance
- Vivaisti, produttori e commercianti sono associati in una filiera produttiva virtuosa
- 2 827 produttori europei, 100 centri di condizionamento certificati e 10 000 lavoratori

www.pinkladyeurope.com

Y&R

Oggi puoi leggere Le Scienze direttamente su iPad.

La nuova applicazione disponibile sull'edicola Newsstand di iPad.

Porta Le Scienze sempre con te. Scarica l'applicazione sul tuo iPad e sfoglia i migliori approfondimenti su scienza, tecnologia ed innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista in prova gratuita per 1 mese.

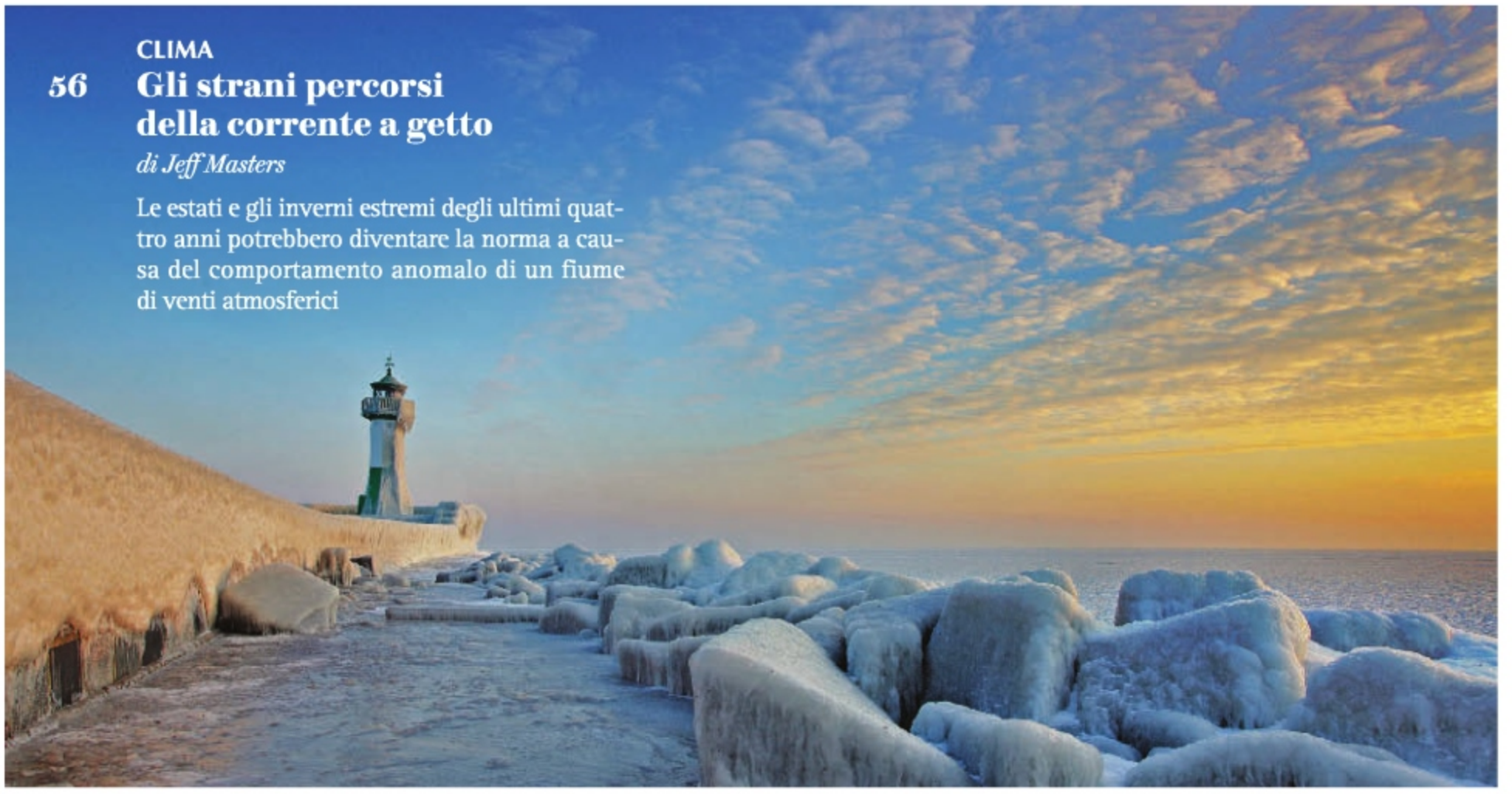
Le Scienze

IN COPERTINA

A marzo 2011 un terremoto e il conseguente tsunami causarono un incidente all'impianto di Fukushima-Daiichi, con perdite di materiale radioattivo. Ora iniziamo a valutarne gli effetti sugli esseri viventi. (Foto di Pierpaolo Mittica)

Sommario

febbraio 2015 numero 558



CLIMA

56 Gli strani percorsi della corrente a getto

di Jeff Masters

Le estati e gli inverni estremi degli ultimi quattro anni potrebbero diventare la norma a causa del comportamento anomalo di un fiume di venti atmosferici

AMBIENTE

32 Le rondini di Fukushima

di Steven Featherstone

Sappiamo poco riguardo agli effetti delle basse dosi di radiazioni su organismi ed ecosistemi. Quattro anni dopo l'incidente di Fukushima, però, gli scienziati cominciano a ottenere qualche risposta

ASTRONOMIA

40 A caccia di fossili nella Via Lattea

di Kathryn V. Johnston

Per chiarire il meccanismo della formazione galattica, gli astronomi vanno alla ricerca dei resti di piccole galassie che in epoche remote furono distrutte e inghiottite dalla nostra galassia

IMMUNOLOGIA

46 L'illusione dell'immunità

di Adam J. Kucharski

Sofisticati strumenti matematici suggeriscono che il sistema immunitario potrebbe avere un punto cieco a causa del quale non rileva le sottili mutazioni del virus dell'influenza

SCIENZE NATURALI

52 La messinscena del ragno

di Ximena Nelson

Alcuni aracnidi fanno davvero di tutto per imitare l'aspetto e il comportamento delle formiche

MEDICINA

64 Il dolore che non passa

di Stephani Sutherland

Nuove conoscenze sulle cause che scatenano il dolore cronico producono idee originali per contrastarlo

INGEGNERIA MECCANICA

72 Il mondo programmabile

di Thomas A. Campbell, Skylar Tibbits e Banning Garrett

Materiali innovativi, stampanti 3D e un nuovo modo di concepire la progettazione potrebbero portare a oggetti in grado di montarsi da soli e cambiare forma o funzione a comando

ARCHEOLOGIA

78 La storia del dio della tempesta

di Zach Zorich

Opere maya appena scoperte fanno luce su un antico conflitto

AERONAUTICA

82 Un volo impossibile

di David Noonan

Per gli esperti, un elicottero alimentato da energia muscolare umana non potrebbe volare: due ingegneri li hanno smentiti

ISTRUZIONE

88 Il metodo scientifico a scuola

di Barbara Kantrowitz

Oggi la ricerca usa strumenti tipici di medicina ed economia per capire quali sono i metodi di insegnamento più efficaci

Sandra Kreuzinger /Getty Images

Sommario

14

20

105

Rubriche

9 Editoriale
di Marco Cattaneo

10 In edicola

12 Anteprima

13 Lavori in corso

14 Intervista
Nel mondo perduto dei *tepui* *di Claudia Di Giorgio*

18 Made in Italy
Un grande aiuto dai batteri *di Letizia Gabaglio*

20 Scienza e filosofia
Una certa idea di ereditarietà *di Telmo Pievani*

21 Appunti di laboratorio
Genealogie molecolari *di Edoardo Boncinelli*

22 Il matematico impertinente
Difficoltà esponenziali *di Piergiorgio Odifreddi*

23 La finestra di Keplero
Obiettivo Europa *di Amedeo Balbi*

24 Homo sapiens
Nuovo quadro per *Homo antecessor* *di Giorgio Manzi*

97 Coordinate
Leggerezza e concretezza *di Mark Fischetti*

98 Rudi matematici
Tris triviale
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

100 Libri & tempo libero

104 Povera scienza
La scienza e i nostalgici ingrati *di Paolo Attivissimo*

105 Pentole & provette
Sostanze odorose *di Dario Bressanini*

SCIENZA NEWS

25 L'incerto futuro di ITER
26 Le due facce della medaglia quantistica
26 Dallo champagne alle centrali elettriche
27 Grandi opere per la fisica cinese
27 La nuova frontiera degli acceleratori
28 Senza alberi, poca agricoltura
28 I rifiuti speciali e pericolosi in Italia
29 Le staminali che non ti aspetti
29 La conquista di un mondo a colori
30 Brevissime

Rolex Awards/Bart Michiels (*in alto*); Dr Jeremy Burgess/SPL/Contrasto (*al centro*); A. Green/Corbis (*in basso*)

LA PIÙ GRANDE MOSTRA SUL MAESTRO DEL RITRATTO

Boldini

LO SPETTACOLO DELLA MODERNITÀ

FORLÌ
MUSEI SAN DOMENICO
1 FEBBRAIO
14 GIUGNO 2015

INFORMAZIONI E PRENOTAZIONI MOSTRA
tel. 199 15 11 34

riservato gruppi e scuole
tel. 0543 36 217
mostraboldini@civita.it

CATALOGO
SilvanaEditoriale

ORARIO DI VISITA
da martedì a venerdì
9.30 - 19.00

sabato, domenica
e giorni festivi
9.30 - 20.00

lunedì chiuso

FONDAZIONE CASSA DEI RISPARMI DI FORLÌ
Fondazione
Cassa dei Risparmi
di Forlì

Comune di Forlì
in collaborazione
con
Comune di Forlì

10000x SE 8.3 — 2 µm — 30.0 kV 1.0

le scienze.it

PER CHI AMA LA SCIENZA, SARÀ LA PIÙ GRANDE SCOPERTA.

LESCIENZE.IT IL SITO TUTTO NUOVO CHE OFFRE UN QUADRO AMPIO, AGGIORNATO E APPROFONDITO SUL MONDO SCIENTIFICO.

L'edizione italiana di "Scientific American" è online con un nuovo sito, arricchito da un notiziario scientifico, dalle pubblicazioni dei ricercatori italiani nel mondo e da una grafica chiara e accattivante. Un punto di riferimento prezioso, per essere sempre aggiornati su tutte le ultime scoperte e ricerche. In più, per chi si abbona alla rivista cartacea, il vantaggio esclusivo di poter consultare senza limiti l'intero archivio di articoli della rivista, dal 1968 ad oggi. Con Le Scienze, nasce un sito tutto da scoprire.

ABBONATI A "LE SCIENZE" E AVRAI ACCESSO A TUTTO L'ARCHIVIO ONLINE.

www.lescienze.it

Le Scienze

Y&R

di Marco Cattaneo

Ritorno a Fukushima

Un primo bilancio dell'impatto ambientale del disastro

Quattro anni fa, l'11 marzo, lo tsunami provocato da un sisma di magnitudo 9.0 spazzò la costa del Giappone settentrionale provocando oltre 30.000 vittime. Ma nell'immaginario popolare la fotografia simbolo di quella catastrofe resta il pennacchio di fumo che si alza dai reattori della centrale nucleare di Fukushima-Daiichi.

Per stimare con buona approssimazione l'impatto ambientale e sulla popolazione della fuoriuscita di isotopi radioattivi dai quattro reattori danneggiati ci vorranno decenni. Ma, come racconta Steven Featherstone a pagina 32, alcuni studi sugli animali stanno già rivelando importanti effetti del *fallout* radioattivo. In particolare, gli studi condotti sulle rondini da Timothy Mousseau, dell'Università del South Carolina, a Fukushima – e in precedenza a Chernobyl – potrebbero offrire importanti indicazioni sulle conseguenze per la salute dell'esposizione a basse dosi di radiazioni.

Quasi tutto ciò che sappiamo sugli effetti delle radiazioni ionizzanti sulla salute umana deriva infatti da uno studio condotto su decine di migliaia di sopravvissuti alle esplosioni atomiche di Hiroshima e Nagasaki, iniziato nel 1945 e tuttora in corso. Ma questo studio non offre praticamente alcuna indicazione su un'esposizione a basse dosi di radiazioni come quella avvenuta proprio a Fukushima, o a Chernobyl. «La maggior parte degli scienziati – ricorda Featherstone – concorda sul fatto che non c'è una dose di radiazioni che sia certamente innocua, per quanto bassa».

Non si sa con certezza se basse dosi di radiazioni possano provocare mutazioni genetiche dannose. Né se queste eventuali mutazioni siano ereditabili. Né quali siano i fattori che espongono a maggior rischio specie diverse, o addirittura i singoli individui di una stessa specie. Insomma, non disponiamo proprio delle informazioni che sarebbero più utili per mettere a punto una strategia di prevenzione e radioprotezione.

I primi risultati sono arrivati nel 2012, con gli studi effettuati da Joji Otaki sulle popolazioni di farfalle nella zona di esclusione di Fukushima. E non sono confortanti. Non solo le farfalle presentavano malformazioni alle ali, alle zampe e agli occhi. Incrociando le farfalle mutanti con farfalle di laboratorio sane, il tasso di anomalie genetiche aumentava di generazione in generazione. Secondo Mousseau, questo accumulo di mutazioni è il vero pericolo per gli ambienti contaminati dalla radioattività.

Christoph Bangert/Vaif/contrasto

Con i suoi colleghi, Mousseau ha studiato dal 1994 le popolazioni di rondine comune dell'area di Chernobyl. E ora sta replicando i suoi studi a Fukushima, dove ha documentato un declino delle popolazioni di uccelli molto più rapido di quello registrato in Ucraina. E sebbene il rapporto 2014 dell'UNSCEAR, l'agenzia dell'ONU sugli effetti delle radiazioni, non desti particolari preoccupazioni, gli studi di Robert Baker sul DNA delle arvicole di Chernobyl sembrano confermare l'idea di Mousseau sull'accumulo di mutazioni nelle generazioni successive.

Per avere un quadro più chiaro sulle conseguenze dell'esposizione a bassi livelli di radiazioni occorrono studi più approfonditi. Perché si possa trarre una lezione utile dai due più gravi incidenti nella storia dell'industria nucleare.

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Christof Koch
docente di biologia cognitiva e comportamentale, California Institute of Technology

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Ernest J. Moniz
docente, Massachusetts Institute of Technology

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani
professore associato filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

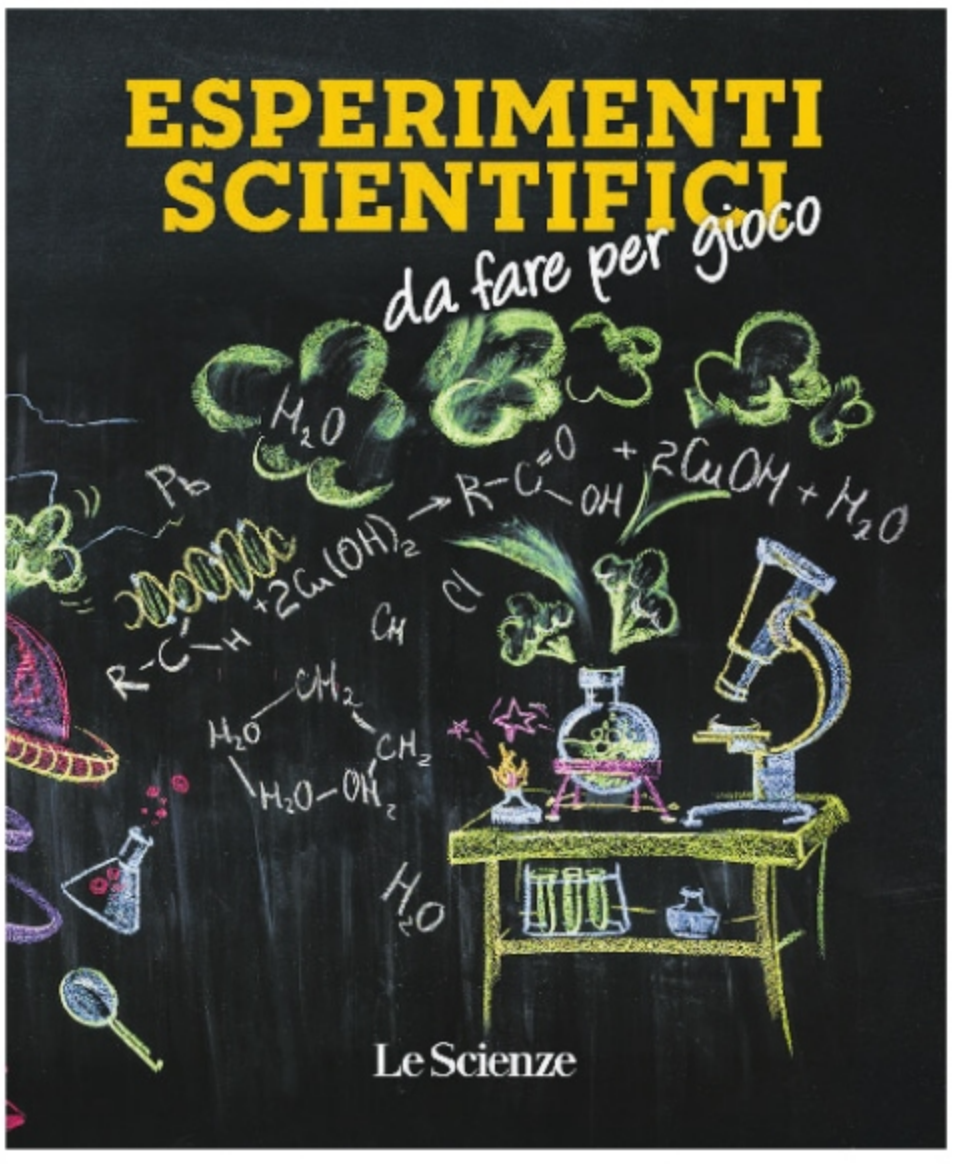
Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

Giocare agli scienziati

A febbraio in edicola *Esperimenti scientifici,* il libro della scienza da scoprire in casa

Per la prima volta da quando siamo nati, era il 1968, portiamo in edicola un prodotto pensato espressamente per i più giovani, ma che, ne siamo certi, non mancherà di affascinare e divertire anche i più grandi. Dal 10 febbraio sarà disponibile il libro *Esperimenti scientifici, da fare per gioco* di Robert Winston e Ian Graham, a soli 9,90 in più rispetto al prezzo di copertina della rivista. Sono 144 pagine di esperimenti da fare a casa, illustrati e spiegati in tavole a colori, rilegate un volume cartonato di grande formato. Nella pagina a fronte ci sono, in formato ridotto, alcuni esempi di quello che potete trovare.

È un'iniziativa a cui crediamo molto. Perché se è vero che siamo nell'epoca dell'economia basata sulla conoscenza, e se è anche vero che la ricerca di base e quella applicata sono due pilastri di questa nuova realtà in cui vivono i paesi più ricchi, e a cui cercano accesso con vigore molti paesi emergenti, allora formazione e istruzione dei più giovani sono un mandato irrinunciabile.



A questo riguardo in Italia non stiamo messi benissimo. Basta dare un'occhiata ai dati più recenti del test PISA, pensato per valutare con periodicità triennale il livello di istruzione degli adolescenti dei principali paesi industrializzati, pubblicati nel 2012 dall'Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD, più conosciuta in Italia come OCSE). Nelle pagine dedicate ai nostri studenti si legge: «L'Italia è uno dei paesi che ha progredito maggiormente nei risultati in scienze tra il 2006 e il 2012. Tuttavia, in Italia il risultato medio in scienze degli studenti quindicenni resta inferiore alla media OECD».

Ecco perché la pubblicazione del libro di esperimenti da fare in casa, che tra l'altro nel 2012 ha ottenuto il massimo riconoscimento dalla britannica Royal Society nel campo delle pubblicazioni pensati per i più giovani, è per noi una scommessa e un auspicio allo stesso tempo. Da una parte vogliamo scommettere che fare scienza, non necessariamente in laboratorio, è divertente e coinvolgente. E come abbiamo già scritto pensiamo di averla vinta, la scommessa, con questo libro. Quanto agli auspici, ci auguriamo che diventando protagonisti degli esperimenti, mettendo letteralmente le mani sui materiali e sulle procedure illustrate nel volume, un gran numero di bambine e bambini, ragazze e ragazzi decidano che «da grandi» vorranno fare gli scienziati. È una scelta personale comune nella storia di tanti grandi ricercatori, e anche di quelli che non compaiono sulle pagine dei giornali, il cui contributo al progresso però è importante tanto quanto quello dei colleghi famosi.

L'emozione che si prova a realizzare esperimenti in prima persona è un ricordo vivo anche a tanti anni di distanza, e in *Esperimenti scientifici* ce n'è per tutti i gusti. Il libro è diviso in cinque sezioni: il mondo dei materiali; forze e movimento; energia in azione; elettricità e magnetismo; il mondo naturale. Alcuni esperimenti sono teatrali ed eccitanti, altri fanno riflettere, altri ancora potrebbero provocare una sana gran confusione (gli adulti sono avvertiti), ma tutti insegnano qualcosa.

Gran parte di essi richiede materiali semplici ed economici, che si possono trovare da un ferramenta oppure acquistare *on line*, e se non vi riusciranno al primo colpo non vi scoraggiate, è normale. Ci sarà solo bisogno di esercizio e di pazienza, in fondo anche la scienza «dei grandi» procede per tentativi ed errori, e raramente i grandi geni non hanno mai sbagliato.

Armati di tutto questo sarà possibile costruire in casa un piccolo *metal detector* (sapevate che bastano una radiolina e una calcolatrice tascabile?), oppure estrarre il DNA, la molecola che conserva le istruzioni della vita, e osservarla con i vostri occhi, il tutto con «ingredienti» che avete in casa, o magari imparare a generare microfulmini. Niente microscopi, sostanze o strumentazioni da laboratorio. La vostra casa sarà il vostro centro di ricerca. E magari nei più grandi che si cimentano con gli esperimenti potrebbe affiorare il dubbio di aver sbagliato tutto nella vita, per non essere diventati scienziati. Ma, come si dice, non è mai troppo tardi.

CICLO CENTRIFUGA
OCCORRENTE:
SEPARAZIONE DI MISCELE
NOTA
LA SCIENZA INTORNO A NOI
MICROFULMINI
OCCORRENTE:
LA SCIENZA INTORNO A NOI
REALIZZARE UN FORNO SOLARE
OCCORRENTE:
NOTA
COLORI SEPARATI
OCCORRENTE:
TRASPIRAZIONE
COME FUNZIONA?
LA SCIENZA INTORNO A NOI
BOLLE DI GHIACCIO
OCCORRENTE:
ATTENZIONE
SUBLIMAZIONE
COME FUNZIONA?
METAL DETECTOR
OCCORRENTE:
COME FUNZIONA?
NOTA
ELETTROMAGNETISMO
LA SCIENZA INTORNO A NOI
GELATINA LUMINOSA
OCCORRENTE:
NOTA
FLUORESCENZA

Creare mondi per trovare soluzioni

La vicarianza, di Alain Berthoz, è il libro allegato con il numero di marzo

Uscire dagli schemi, vietato vietare, abbracciare la diversità. Sembrano slogan di un passato nemmeno troppo lontano di lotta e protesta sociale, ma in realtà potrebbero essere strategie grazie a cui risolvere uno dei conflitti più recenti della nostra epoca, ovvero la rivendicazione dell'individuo di fronte a poteri immensi delle istituzioni sociali. La proposta non è di uno dei tanti ispiratori di movimenti recenti che hanno incrinato, quando non letteralmente abbattuto, la solidità di sistemi politici ben consolidati, ma di Alain Berthoz, professore di fisiologia della percezione e dell'azione al Collège de France, dove dirige anche un laboratorio dedicato a questo ambito di ricerca, e membro dell'Accademia delle scienze parigina.

Attento osservatore della realtà, Berthoz nota che ormai le nostre società stanno conoscendo rivolgimenti in cui gli estremi si affrontano in battaglie implacabili dall'esito incerto, stretti nella morsa dei propri immutabili pensieri. La soluzione è il ricorso a quella che Berthoz chiama «vicarianza», ovvero la «supplenza di un processo con un altro processo che conduce allo stesso risultato, uno strumento fondamentale degli organismi viventi, perché gli offre la potente capacità di creare, di innovare e di interagire con gli altri in modo flessibile, tollerante e generoso», come scrive il fisiologo nel libro allegato a «Le Scienze» di marzo e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni con il titolo *La vicarianza*.

Il cervello umano è particolarmente adatto a seguire una strategia del genere. Come argomenta Berthoz, la vicarianza implica l'emancipazione dalla realtà e dai suoi vincoli, implica pure l'ingresso in mondi immaginari che, appunto, solo il nostro cervello sa concepire. Un esempio? La serendipity. Semplificando, «scoperte fatte per caso», a cui la scienza deve tanto e che presuppone che l'autore della scoperta sia dotato della capacità di «cambiare punto di vista, organizzare il confronto fra le regole tradizionali e l'opposizione a una regola scaturita da un caso singolare». Non fu forse così che alla fine degli anni trenta il britannico Alexander Fleming scoprì le proprietà antibatteriche della penicillina, aprendo la strada agli antibiotici?

Questa capacità tipica del nostro cervello potrebbe avere importanti ricadute anche in ambito sociale. Il concetto di vicarianza, spiega Berthoz, si interroga sulla relazione fra l'universale e il particolare, la specie e l'individuo, la regola e la sua eccezione.

In questa tensione di opposti, la capacità di trovare soluzioni che rompano gli schemi attraversando mondi immaginari e lavorino sul concetto di prossimità può liberare una capacità creativa da concentrare, per esempio, sul tema dei diritti umani, sempre più attuale con la globalizzazione delle relazioni tra persone. Ma, quale che sia il problema, la proposta di Berthoz ruota attorno alla potenza immaginaria e feconda del nostro cervello. Non è un richiamo all'anarchia, ma alla volontà di esplorare mondi diversi dal proprio per nuove soluzioni in tempi rivoluzionari.

RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 7,90 incluso il prezzo di spedizione e telefonando al numero 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni non abilitati).

La stessa offerta è valida per acquistare i volumi della collana **I grandi della scienza** nella nuova edizione al prezzo di € 6,90 incluso il prezzo di spedizione.
Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa).

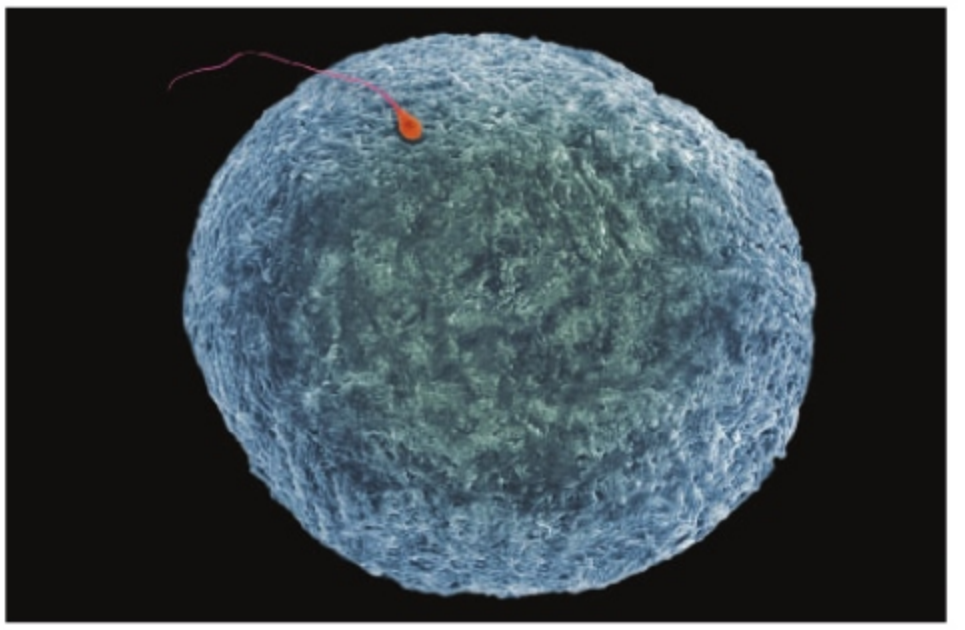
VLADGRIN/Shutterstock

a cura di Giovanni Spataro

I gameti che non ti aspetti

Cellule adulte umane sono state trasformate in precursori di ovociti e spermatozoi

Non è la soluzione al quesito «È nato prima l'uovo o la gallina?», ma la scoperta di Azim Surani dell'Università di Cambridge ci somiglia molto. In uno studio pubblicato su «Cell», il ricercatore ha ottenuto *in vitro* cellule germinali primordiali (PGC) umane, cioè i precursori di ovociti e spermatozoi, partendo da cellule epiteliali (si veda *Uovo: storia di una cellula*, in «Le Scienze» n. 524, aprile 2012). Il risultato segue un successo simile ottenuto un paio di anni fa da scienziati giapponesi con cellule epiteliali di topo, prima riprogrammate a staminali pluripotenti e poi forzate a svilupparsi in PGC. I successivi tentativi di riprodurre la stessa trasformazione su cellule umane si erano però rivelati poco efficienti, fino quando Surani ha capito che nel caso dell'essere umano è fondamentale lavorare sull'attività del gene *SOX17*, a differenza di quanto avviene nei topi, in cui è *Sox2* a essere cruciale per avere PGC.



L'albero degli uccelli

Sequenziati. Uccelli analizzati nello studio sul loro albero evolutivo conservati al Museo di storia naturale di Washington.

Centinaia di scienziati di 20 paesi e oltre quattro anni di lavoro hanno permesso di ricostruire con un dettaglio senza precedenti l'albero evolutivo degli uccelli. Tanto per dare un'idea della mole dei dati in gioco, i risultati di quello che è solo l'inizio del più grande studio genomico su una singola classe di vertebrati hanno portato alla pubblicazione di 28 articoli, di cui otto su «Science» e gli altri si riviste scientifiche curate da BioMedCentral.

Ma le vere protagoniste sono le 45 specie di uccelli, il cui genoma ha fatto luce su caratteristiche ed eventi evolutivi che riguardano questi animali. Uno tra tutti, gli scienziati hanno individuato un «big bang» aviario nei 10-15 milioni di anni successivi all'estinzione dei dinosauri, avvenuta 65 milioni di anni fa (si veda *Vittoria alata*, in «Le Scienze» n. 505, settembre 2010). Inoltre hanno scoperto che l'apprendimento vocale si è evoluto almeno due volte, e che il canto è associato con oltre 2700 geni che rappresentano oltre il dieci per cento del genoma codificante.

Cinquanta di questi geni, responsabili dell'apprendimento delle melodie, sono attivi nelle stesse regioni cerebrali che nella nostra specie sono coinvolte nel linguaggio. Gli scienziati hanno anche mostrato che il gene *FOXP2* è centrale nell'attività vocale negli uccelli e negli esseri umani. E siamo, appunto, solo all'inizio.

Selfie extraterrestre. Autoritratto di Curiosity, il rover della NASA che studia l'ambiente marziano, alla ricerca della vita.

Picchi su Marte

Il mistero del metano marziano diventa sempre più fitto e intrigante. Come riportato in due articoli pubblicati da «Science», il rover Curiosity della NASA, arrivato su Marte il 6 agosto 2012, ha rilevato nei pressi del cratere Gale concentrazioni in atmosfera di gas metano che periodicamente arrivano a valori dieci volte superiori a quelli di base (si veda *L'ora di Curiosity*, in «Le Scienze» n. 527, luglio 2012). Questi picchi di metano hanno attirato l'attenzione dei ricercatori, visto che sulla Terra la stragrande maggioranza di questo gas ha un'origine biologica, ovvero è prodotto da microrganismi.

Tuttavia gli autori dei due studi, ricercatori del Goddard Space Flight Center della NASA, non si sono sbilanciati. Ancora non è possibile stabilire con certezza l'origine dei picchi di metano marziano rilevati da Curiosity, hanno affermato gli scienziati statunitensi. Per quanto ne sappiamo potrebbero essere anche il prodotto di reazioni chimiche che non coinvolgono forme di vita, oppure potrebbero essere una manifestazione locale di un vento di metano che ha origine in punti lontani dal cratere Gale. Nel frattempo altre analisi di Curiosity, pubblicate sempre su «Science», suggeriscono su Marte un'abbondante presenza di acqua, altra molecola legata a doppio filo con la vita, tra 3 e 3,7 miliardi di anni fa.

ERRATA CORRIGE

Nel numero di gennaio 2015, nell'articolo *Batterie che catturano il calore disperso*, dello speciale *Idee che cambiano il mondo*, a p. 41, alla nona riga dall'alto c'è scritto: «[...] ha sviluppato un modo per raccogliere calore a temperature dieci volte inferiori: fino a 50 gradi Celsius». In realtà, la frase corretta è: «[...] ha sviluppato un modo per raccogliere calore a differenze di temperature di 50 gradi Celsius.» Sempre nel numero di gennaio, nell'articolo *L'evoluzione dell'architettura*, a p. 81, alla prima riga del primo paragrafo c'è scritto: «Tuttavia, quando incrociarono gli ibridi con i topi delle dune [...]». In realtà si tratta di topi cervo. La frase quindi diventa: «Tuttavia, quando incrociarono gli ibridi con i topi cervo [...]». Ce ne scusiamo con i lettori.

Dennis Kunkel Microscopy, Inc./Visuals Unlimited/Corbis (*ovocita e spermatozoo*); cortesia AAAS/Carla Schaffer (*uccelli*); cortesia NASA/JPL-Caltech/MSSS (*Curiosity*)

di Claudia Di Giorgio

Nel mondo perduto dei *tepui*

Tra il sud-est del Venezuela e il nord del Brasile, al di sotto di una spettacolare schiera di montagne con la sommità piatta, chiamate *tepui*, si estende un sistema di grotte gigantesche e antichissime, che ospitano minerali e organismi sconosciuti, evolutisi per milioni di anni in condizioni di isolamento completo. Un vero e proprio mondo perduto, nascosto nelle profondità della Terra, ancora tutto da esplorare: come sta facendo Francesco Sauro, giovane speleologo italiano che grazie al suo progetto di quattro nuove spedizioni – dopo le cinque già effettuate – nelle più remote delle grotte sotto i tepui, ha vinto il Rolex Awards for Enterprise 2014.

Destinato a giovani innovatori – non più di trent'anni – che hanno dimostrato «doti di leadership e capacità di applicare la tecnologia in modo originale e hanno come obiettivo migliorare il benessere della collettività, la qualità dell'ambiente e far progredire le conoscenze scientifiche», il premio consiste in 50.000 franchi svizzeri da usare per lo sviluppo dei loro progetti. Abbiamo incontrato Sauro a Londra in occasione della consegna dei premi presso la Royal Society, la più antica società scientifica del mondo.

Che cosa rende queste grotte diverse dalle altre?

Anzitutto il fattore tempo. Le grotte che conosciamo, a cui siamo abituati, sono in calcare, con rocce solubili, carsificabili, che hanno un tempo di sviluppo breve rispetto a quelle dei tepui. Una grotta in calcare può avere uno o due milioni di anni, al massimo qualche milione. Qui invece parliamo di grotte che ne hanno decine di milioni, quindi tutto quello che ci troviamo dentro sarà una testimonianza di 10, 20, anche 100 milioni di anni fa.

L'altro aspetto è che sono fatte di quarzo, quindi di silice. Tutto ciò che c'è, anche il mondo animale, non gira intorno al carbonato, ma alla silice, che è uno dei minerali più antichi del pianeta. Quando è cominciata la vita sulla Terra c'era solo la silice, e altri minerali di origine vulcanica. In queste grotte, dunque, possiamo trovare organismi molto antichi, con affinità alle origini della vita.

Alessio Romeo/La Venta (*a fianco*); Riccardo De Luca/La Venta (*sopra*); F. Lo Mastro/La Venta (*a fronte*)

CHI È

Francesco Sauro, nato a Padova nel 1984, ha iniziato l'attività di speleologo all'età di 13 anni sotto la guida del padre e dello zio.
A soli 19 anni è invitato a partecipare a una spedizione dell'associazione La Venta (www.laventa.it) nello Stato messicano di Durango.
Da allora ha preso parte a 23 spedizioni speleologiche in Asia e America Latina, guidandone 12. Ha esplorato oltre 50 chilometri di sistemi di grotte non ancora mappati.
Laureato in geologia all'Università di Padova, ha conseguito il dottorato di ricerca, sempre in geologia, all'Università di Bologna nel 2014.
Nel 2009 ha iniziato l'esplorazione delle grotte dei *tepui,* dove ha scoperto tra l'altro un nuovo minerale – battezzato rossiantonite – e nuove specie di organismi sotterranei.

Lo speleologo e geologo italiano Francesco Sauro esplora le profondità della Terra alla scoperta di grotte antichissime che ospitano minerali e organismi sconosciuti

Marzo 2014, esplorazione delle grotte dell'Auyantepui, in Venezuela. A fianco, Francesco Sauro nella grotta Imawarí Yeután. Sopra, il gruppo di La Venta guidato da Sauro nei settori più profondi della grotta; sotto, Chiwou Yeuta, la «grotta della nebbia».

Quindi sono ambienti ideali per studiare l'evoluzione?

Non si può escludere che una fase dell'evoluzione della vita sia avvenuta nelle grotte. Un obiettivo importante della ricerca astrobiologica su Marte, per esempio, sono le grotte marziane, perché sono un ambiente protetto dai raggi cosmici e a temperatura costante. Ma le grotte dei tepui, in particolare, sono isole ecologiche, dove c'è più tempo per l'evoluzione perché si tratta di un ambiente statico. Parliamo di gallerie che sono state abbandonate dall'acqua magari 20 milioni di anni fa, dove per 20 milioni di anni non è successo più niente. A parte l'aria che circola – e nemmeno dovunque – tutto è rimasto fermo. In quale altro luogo della Terra si trova un posto dove da 20 milioni di anni tutto è rimasto uguale?

Lei si considera più uno scienziato o più uno speleologo?

Ho avuto la fortuna di avere unito le due cose. Sono nato come speleologo, poi ho capito che il modo migliore per focalizzare questo interesse era trasformarmi in geologo. Ma non solo. Quando organizzo una spedizione, come in questo progetto, la ricerca deve coprire tutto il contesto dell'ambiente della grotta, quindi anche biologia, microbiologia, eccetera. Secondo me, l'esplorazione delle grotte senza la parte di documentazione e ricerca rimane un po' limitata agli aspetti spettacolari, alla bellezza delle foto. Bisogna riuscire sia a comunicare al pubblico quello che stai facendo sia a dargli un significato di conoscenza.

Si può parlare di un nuovo modo di fare esplorazione, meno «geografico» e più scientifico?

In generale no, ci sono precedenti addirittura nell'Ottocento, ma certamente è nuovo per quel che riguarda le grotte. Negli ultimi decenni si sono fatte tantissime esplorazioni speleologiche, anche in Europa. I russi, per esempio, stanno esplorando grotte pazzesche in Georgia, o anche gli italiani, sul Matese. Ma la comunità scientifica comincia a capire solo ora che le potenzialità dell'esplorazione speleologica delle grotte sono enormi.

Fino a dieci anni fa le pubblicazioni scientifiche in questo campo erano molto rare, adesso i risultati delle ricerche in grotta stanno arrivando a «Nature» e «Science». Sta nascendo una vera e propria scienza delle grotte, ci sono riviste internazionali *peer reviewed* dedicate solo alla speleologia, come «International Journal of Speleology».

A marzo partirà con il suo gruppo per una nuova spedizione nei tepui, questa volta in Brasile. Con quali obiettivi principali?

L'ambiente microbiologico delle grotte – di tutte le grotte, non solo dei tepui – finora è stato assai poco studiato perché sono ricerche molto complicate da effettuare in sito. Molti organismi estremofili vivono nelle grotte, e spesso sono chemiotrofi, cioè usano reazioni chimiche per alimentarsi. Ora si è scoperto che all'origine di certe concrezioni stranissime che si pensava fossero dovute a fenomeni chimici di capillarità in realtà ci sono batteri che controllano la crescita: in pratica, se hai due di questi organismi, uno qua e uno là, vanno e si incontrano.

Rolex Awards/Stefan Walter (*a fianco*); Rolex Awards/Bart Michiels (*in alto*); Vittorio Crobu/La Venta (*a fronte*)

Colonne di silice. A fianco e sotto, due spettacolari immagini della grotta Imawarí Yeutá. A fronte, Sauro all'interno della Spluga della Preta, sotto i monti Lessini, uno degli abissi più famosi del mondo.

Sono aspetti interessantissimi, ma studiarli è davvero complicato. Nella nostra prossima spedizione quindi ci proponiamo di fare studi microbiologici estremamente dettagliati, e per farlo useremo dei *fixer*, prodotti che fissano il DNA, che abbiamo già sperimentato. Normalmente per analizzare un campione è necessario portarlo subito in laboratorio, invece con questi fissatori si può aspettare anche due o tre settimane.

Che tipo di campioni in particolare?

Sulle pareti di queste grotte ci sono patine di natura biologica, da cui poi si formano le stromatoliti, che in questo caso hanno origine dall'interazione tra batteri e silice, e non calcare come nelle grotte più note. Secondo uno studio che abbiamo realizzato in collaborazione con il Politecnico di Zurigo, e pubblicato sulla rivista «Sedimentology», questi depositi potrebbero avere un'origine esterna. Ci sono solfati che non sono presenti dentro la quarzite, la roccia della montagna: attraverso gli isotopi abbiamo capito che questi solfati provengono dall'atmosfera. In pratica, le correnti d'aria entrano in queste grotte nel corso di milioni e milioni di anni. I batteri che vivono nella grotta, non trovandovi fonti di alimentazione, prendono questi solfati dall'aria. Sfruttano il processo chimico della riduzione per avere energia e li fissano formando depositi e minerali particolarissimi.

Però in questo processo il fattore tempo è importantissimo, nelle grotte normali non possiamo vederlo. Nell'aria non ce n'è tanto di questo materiale, per cui servono 10 milioni di anni per vedere depositi così spessi di solfati.

Le vostre esplorazioni potrebbero avere ricadute pratiche?

Un altro aspetto molto interessante di queste ricerche è che avendo per oggetto batteri che non hanno mai avuto nessun contatto con l'uomo possono essere utili in prospettiva per lo studio di nuovi antibiotici. In effetti in questo ambito c'è ancora molto da fare, bisogna sviluppare nuovi approcci, e sono ancora in pochi – tra cui la NASA – a essersi accorti delle sue potenzialità.

Lei svolge la sua attività nell'ambito dell'associazione La Venta, di cui è anche vice presidente. Chi siete e che cosa fate?

La Venta è un gruppo privato di ricerca che organizza e gestisce esplorazioni geografiche, con particolare attenzione per le esplorazioni speleologiche. Oltre a questo, nei tepui abbiamo molti altri progetti in corso: uno dei più famosi è quello nelle grotte dei cristalli giganti di Naica, in Messico (si veda in proposito *La foresta dei cristalli giganti*, di G. Badino e P. Forti, in «Le Scienze»» n. 514, giugno 2011), ma ce ne sono molti altri.

Con quali rapporti con il mondo della ricerca?

Nei nostri progetti sono entrati molti enti di ricerca. In pratica, La Venta è la struttura che crea il progetto, organizza la logistica, che può essere molto complessa, ha le competenze tecniche e la tecnologia che rendono possibile agli scienziati e alle loro ricerche di raggiungere luoghi altrimenti inaccessibili. Sui tepui, per esempio, andiamo lì, cerchiamo le grotte, le troviamo, le esploriamo e poi focalizziamo l'attenzione degli scienziati sui vari possibili ambiti di interesse.

di Letizia Gabaglio

Un grande aiuto dai batteri

Micro4yoU è uno spin-off universitario che studia microrganismi per sfruttarli in diversi settori, da quello ambientale e dei beni culturali a quello agroalimentare

Che cosa possono fare i microbi per te? O meglio, per la collettività? Una domanda che Annalisa Balloi, laureata in biologia all'Università di Cagliari, si comincia a porre a metà degli anni 2000, quando dalla sua isola si muove prima al Consiglio nazionale delle ricerche di Pisa e poi a Milano, all'Università degli Studi. «Con il dottorato mi sono avvicinata al mondo dei microrganismi e delle loro straordinarie proprietà», racconta la microbiologa. «In particolar modo ho studiato i batteri simbionti degli animali superiori, quei microrganismi cioè che vivono in simbiosi con altri organismi, concentrando la mia attenzione su ciò che accade nelle api». Dei batteri in fondo si sa ancora poco, e lo studio delle loro caratteristiche è uno dei campi delle biotecnologie più dinamico, con un grande potenziale per le possibili applicazioni. Il settore perfetto per Balloi, che fin da studentessa non vedeva davanti a sé una carriera accademica tradizionale e sognava di portare le sue ricerche fuori dall'università.

La spinta le viene dagli incontri che fa a Milano, primo fra tutti quello con Daniele Daffonchio, professore ordinario di microbiologia agraria e suo mentore. Insieme a lui e ad altri ricercatori, Balloi partecipa nel 2009 a una competizione per *start-up* della Lombardia. «Il nostro progetto riguardava l'uso di batteri nel settore agroalimentare: avevamo individuato batteri simbionti delle api, che normalmente vivono nell'intestino di questi insetti, che le aiutano a superare lo stress», va avanti Balloi. «A partire da un nostro brevetto, l'idea era realizzare un prodotto a base di questi microrganismi per combattere la moria di api causata dalla peste americana, fenomeno sempre più frequente negli ultimi anni, che ha un impatto importante dal punto di vista economico e ambientale».

Dalle api ai monumenti

Con il progetto Micro4Bee Balloi passa le prime selezioni, vince 12.000 euro e un corso per sviluppare un *business plan*. Decide così di fondare uno *spin-off* universitario, Micro4yoU, di cui è amministratore delegato, per sfruttare il brevetto messo a punto e per farlo all'interno dell'Università degli Studi di Milano. Dopo un primo momento di euforia per i risultati conseguiti, però, arriva la doccia fredda: servono capitali per sviluppare l'idea in un prodotto veterinario, e in Italia i famosi *venture capitalist* scarseggiano come non mai.

«I potenziali investitori che incontravamo ci facevano i complimenti per le nostre ricerche ma sollevavano molti dubbi: eravamo ancora troppo lontani da un prodotto pronto per il mercato e ci rivolgevamo a un settore troppo piccolo», sottolinea Balloi. È il destino di chi vuole fare impresa a partire dalle biotecnologie: ci vogliono investimenti ingenti, e si tratta di investimenti rischiosi. Diversamente da quano accade per altri settori, come il digitale, in cui i fondi per far partire un'impresa non sono così tanti e il ri-

LA SCHEDA

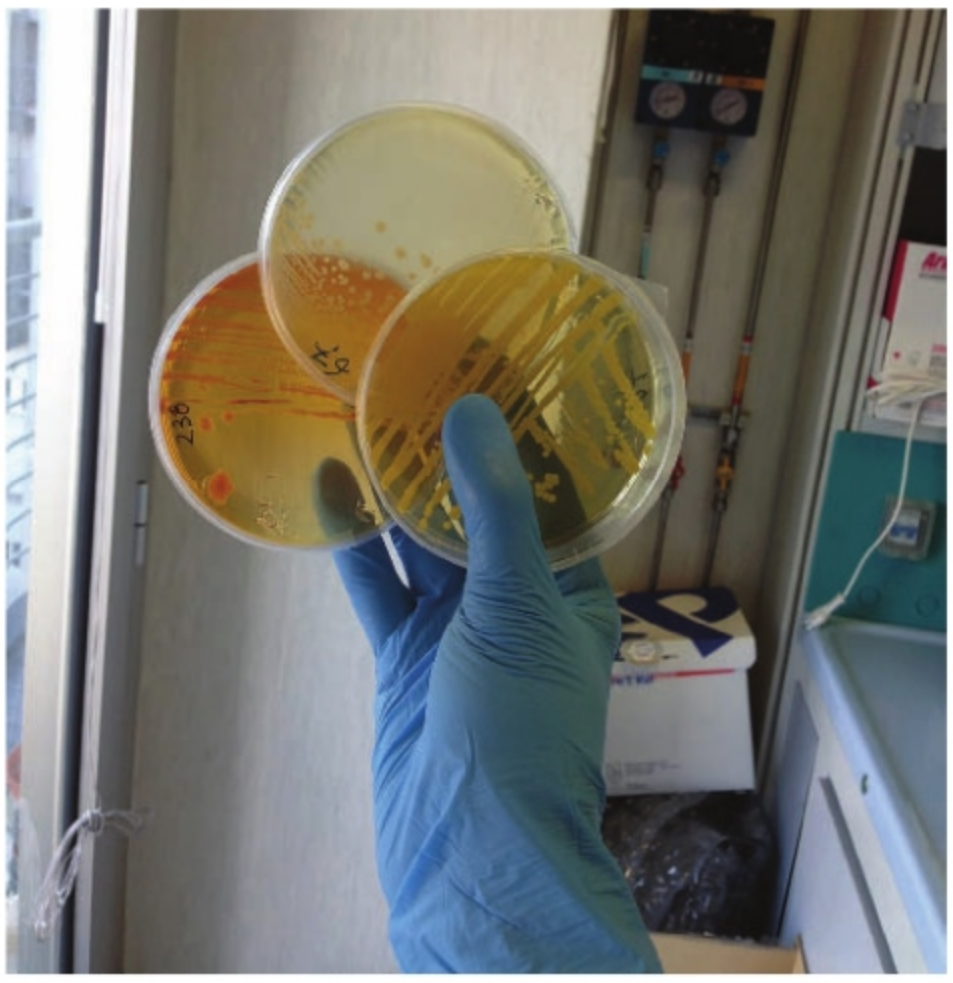
Micro4yoU

Fatturato
n.d.

Investimenti in ricerca
tutto il ricavato

Dipendenti/collaboratori
2 di cui 2 impiegati in R&S

Brevetti rilasciati
2



Incrostazioni e farmaci. A sinistra, sulla superficie della statua ci sono incrostazioni di solfato di calcio, a destra la superficie pulita dopo l'uso del prodotto di Micro4yoU. A fronte, esperimenti nel laboratorio di Micro4yoU, che sperimenta un farmaco per api mellifere (*sotto*).

torno è sul breve periodo. «Ma noi non avevamo nessuna *app* nel cassetto...», dice ancora l'amministratore delegato. «E comunque non ci siamo persi d'animo. Ci siamo guardati intorno, cercando progetti simili al nostro».

Senza andare troppo lontano, Balloi scopre che proprio all'Università di Milano c'è una ricercatrice, Francesca Cappitelli, che ha messo a punto un sistema per pulire i monumenti dallo smog grazie a batteri. Il gruppo di ricerca ha anche depositato un brevetto, che però non ha avuto sviluppo fuori dall'ambito accademico. Balloi non ci pensa due volte e si offre di rilevarlo: «In questo modo potevamo lavorare allo sviluppo di un prodotto più facile da vendere, perché ci sono meno autorizzazioni rispetto al farmaco veterinario, e allo stesso tempo continuare a sviluppare il nostro progetto iniziale», spiega la microbiologa. Nel settembre 2011 Micro4Art è presentato a SMAU, fiera dell'innovazione italiana, e qualche mese dopo vince il premio Gaetano Marzotto aggiudicandosi 250.000 euro per cominciare lo *scale up* produttivo.

Microscopici aiutanti

In che cosa consiste questo prodotto? Si tratta di un bioformulato a base di batteri che rimuove dalle superfici di pietra le incrostazioni di solfato di calcio, le macchie nere per intenderci. Ci riesce perché i batteri respirano solfato, come noi respiriamo ossigeno, e quindi una volta applicato il prodotto cominciano a destrutturare le croste che poi possono essere lavate via facilmente.

I microrganismi usati vivono di solito nei terreni ricchi di zolfo, non sono pericolosi per esseri umani e ambiente e a contatto con ossigeno e privati del solfato muoiono, quindi non c'è il rischio di proliferazione. In più, al contrario di quanto avviene con altri prodotti che si usano per la pulitura dei monumenti, sono rispettosi della pietra e concentrano la loro azione solo sulle croste nere, come hanno dimostrato i test su diverse opere d'arte, quali la chiesa di Santa Maria delle Grazie a Milano e la Cattedrale di Matera, tanto che oggi Micro4yoU ha trovato un accordo con un grande distributore ed è entrato con Micro4Art sul mercato. In più lo spin-off offre anche una serie di servizi di diagnostica: mappatura delle popolazioni batteriche che abitano i diversi monumenti e identificazione di quelli che ne causano il deterioramento, primo passo per capire quale sia il trattamento migliore per rimuoverli.

In questo modo i ricercatori dello spin-off hanno dimostrato di poter arrivare alla messa in commercio, di avere fiuto per gli affari e allo stesso tempo stanno accumulando risorse e competenze per realizzare il sogno del farmaco per le api, che si fa sempre più realtà. Dopo i test di laboratorio sono iniziate le prime sperimentazioni su alveari con l'autorizzazione del Ministero della Salute ed è iniziato il lungo iter autorizzativo a livello nazionale ed europeo per la messa in commercio. Le collaborazioni scientifiche sono cresciute, grazie al lavoro svolto insieme a ricercatori dell'Università di Torino e a quella di Tunisi, ma gli investitori continuano a scarseggiare. Balloi continua a cercare qualcuno che voglia puntare sui batteri, come hanno fatto lei e i suoi colleghi. Perché i batteri possono fare molto per tutti noi.

Cortesia Micro4yoU (*foto in questa pagina e nella pagina a fronte, 3*)

di Telmo Pievani
è professore associato di filosofia delle scienze biologiche dell'Università degli Studi di Padova

Una certa idea di ereditarietà

Un ricordo di Conrad H. Waddington, che anticipò la visione sistemica del genoma

Negli anni quaranta un biologo molto creativo osservò che se esponiamo le pupe dei moscerini della frutta a uno *shock* termico queste cominceranno a esprimere caratteri fenotipici particolari sulle ali. Se lo stress ambientale permane e i mutanti vengono selezionati, dopo alcune generazioni succede qualcosa di sorprendente: i tratti fenotipici delle nuove varianti morfologiche, indotte dall'ambiente, vengono acquisiti e diventano ereditari. Il risultato apparentemente lamarckiano doveva avere una spiegazione. Nel 1959 lo scopritore ipotizzò su «Nature» che doveva esserci una variabilità genetica criptica preesistente, che rimane silente finché il processo di sviluppo è normalmente canalizzato ma che in presenza di un forte stress si manifesta, viene selezionata e diventa ereditabile.

Un gruppo di biologi italiani esperti di proteine dello stress (in particolare termico, le Hsp) ha provato a indagare gli aspetti molecolari di questa teoria nota come «assimilazione genetica» (si veda Piacentini L. e altri, in «Chromosoma», Vol. 123, pp. 345-354, 2014). Sotto stress, l'attività del gene *Hsp90* viene ridotta e questo innesca un aumento di variazioni, con conseguente comparsa di molte varianti fenotipiche. Ma è proprio vero che ci sono variazioni criptiche che sono liberate quando viene a mancare la sorveglianza di questo gene modulatore della variabilità e della plasticità?

È interessante che un esperimento di settant'anni fa trovi nuove interpretazioni. Il suo ideatore si chiamava Conrad H. Waddington, ed è bene ricordarlo, anche perché nel 2015 ricorrono i quarant'anni dalla morte. L'influenza di questo straordinario biologo dello sviluppo e genetista, uomo di vasta cultura e di multiformi interessi anche artistici, in forza all'Università di Edimburgo dal secondo dopoguerra, non è oggi riconosciuta come meriterebbe (forse perché simpatizzava per il marxismo ed era darwiniano a modo suo). A Waddington dobbiamo concetti anticipatori come epigenetica, canalizzazione, paesaggio epigenetico, e una visione sistemica del genoma che oggi è attualità.

Il responso? Secondo gli autori dello studio la spiegazione del mistero delle drosofile lamarckiane non sarebbe soltanto quella suggerita da Waddington. Ma questo fa parte del gioco della scienza, e lui ne sarebbe contento. I colpevoli sono forse i trasposoni, gli elementi mobili del genoma che si spostano nei cromosomi e creano cascate di mutazioni, riarrangiamenti e modificazioni nell'espressione genica. In presenza di stress ambientali, come già aveva intuito Barbara McClintock nel 1984, i meccanismi che tengono a bada questi vagabondi in tempi normali (primo fra tutti proprio *Hsp90*) si allentano e la variabilità genetica aumenta.

Nelle drosofile sotto stress termico i trasposoni iperattivi producono nelle cellule germinali, fra tante altre mutazioni, anche quella coincidente con il fenotipo osservato da Waddington e indotto dall'ambiente come reazione allo stress. Succede così che, se lo stress continua per più generazioni, questo fenotipo di successo può diventare stabile attraverso la selezione di individui portatori della mutazione ereditaria corrispondente, emersa *ex novo* e prodotta dai trasposoni.

In pratica lo stress genera sia le varianti morfologiche degli animali che plasticamente si adattano a ogni generazione sia le mutazioni ereditarie corrispondenti che poi si diffondono nella popolazione. Non c'è quindi un passaggio diretto dal carattere acquisito al genoma (Lamarck può riposare tranquillo), ma una coselezione di varianti epigenetiche e di varianti genetiche corrispondenti: è un'assimilazione apparente dovuta a un meccanismo adattativo noto dal 1896 come «selezione organica» o «effetto Baldwin» (da James M. Baldwin, un altro eterodosso a lungo dimenticato ma in predicato di riabilitazione grazie ai trasposoni, a ulteriore riprova dei percorsi imprevedibili della scienza).

Uguali e diversi. Petali di una pianta di dalia di colori diversi, probabilmente il risultato di mutazioni genetiche indotte da elementi mobili del genoma, i trasposoni.

Dr Jeremy Burgess/SPL/Contrasto

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

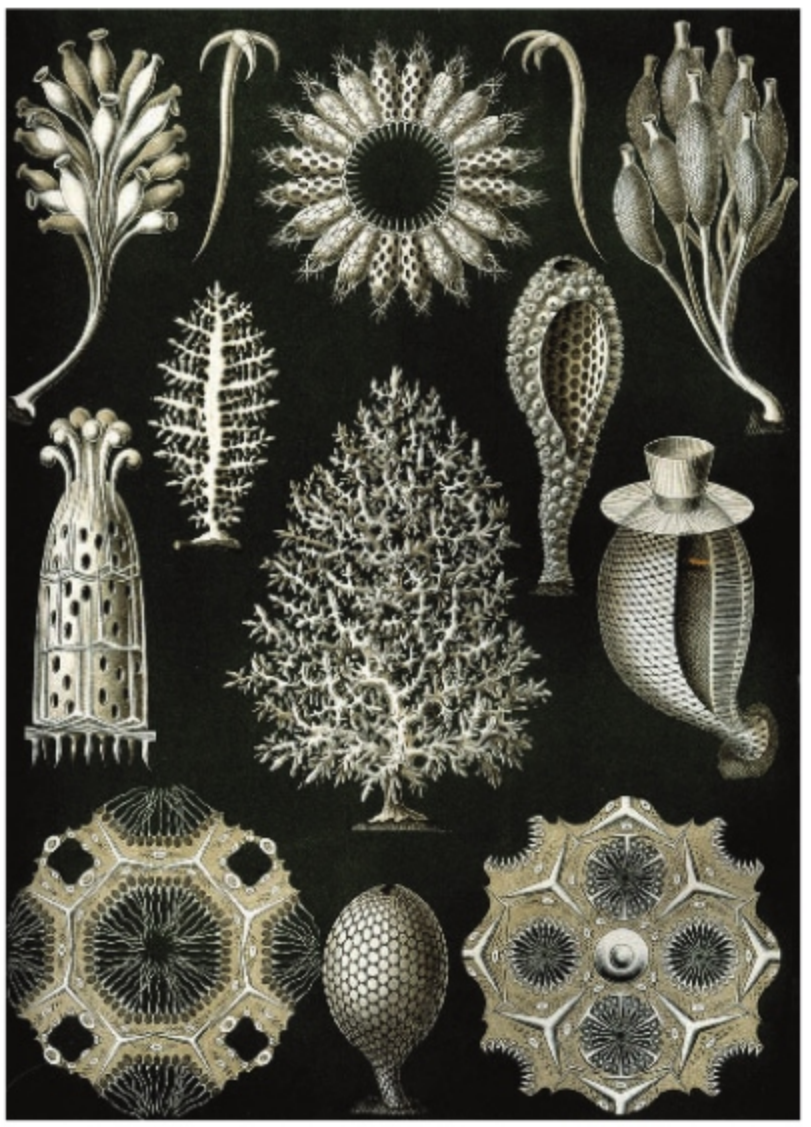
Genealogie molecolari

L'albero evolutivo di una famiglia di geni fa luce sullo sviluppo dei primi animali

Se le specie di oggi derivano dalle specie di ieri, devono condividere con quelle elementi fondamentali, rappresentati per esempio da famiglie di geni e dalla loro regolazione. È sempre più chiaro che le cose stanno proprio in questi termini, e queste osservazioni costituiscono nel loro insieme una delle più stringenti dimostrazioni della veridicità della teoria dell'evoluzione biologica degli esseri viventi. Seguire le vicende evolutive di alcune famiglie geniche permette inoltre di delineare una sorta di genealogia molecolare delle diverse specie.

I geni regolatori contenenti uno specifico motivo strutturale chiamato omeobox sono presenti in tutto il regno animale, e tra essi si possono distinguere un certo numero di famiglie geniche specifiche. La prima famiglia scoperta è stata quella dei geni *Hox*, un gruppetto di geni che si trovano l'uno in fila all'altro sul DNA del genoma e che controllano collettivamente il corretto sviluppo degli animali superiori lungo il loro asse corporeo principale, quello che va dalla testa alla coda.

Negli insetti come nei vertebrati, l'identità di testa, collo, spalle, torace e addome è stabilita e controllata da questi geni, presenti, quasi identici, in tutti gli animali superiori che si trovano appena sopra il livello delle meduse, o celenterati. Anzi, nelle meduse vere e proprie, gli cnidari, ce n'è qualcuno, mentre nelle meduse del gruppo degli ctenofori sembrano assenti, come abbiamo raccontato nel numero dello scorso ottobre. Per questo motivo, forse, gli ctenofori hanno un'organizzazione tutta particolare del sistema nervoso. Ma la saga continua.



Ritratti di spugne. Illustrazione di *Calcispongiae*, dello zoologo tedesco Ernst Haeckel, vissuto tra XIX e XX secolo.

Corbis

Una famiglia di geni omeobox strettamente imparentata con quella degli *Hox* è quella dei *ParaHox* e con entrambe è imparentata la famiglia dei geni chiamati *NK*. È ragionevole pensare che queste tre famiglie derivino a loro volta dall'evoluzione di una famiglia ancora più antica detta *ANTP*. Nel tempo questa avrebbe dato luogo alla famiglia *NK* e a quella *ParaHox*, mentre in un secondo momento da quest'ultima si sarebbero separati i geni *Hox* veri e propri. Questo per quanto riguarda i geni. Ma quali sono i tipi animali che si trovano al di sotto delle meduse, ovvero alla base stessa del regno animale, e risalenti tra 700 e 800 milioni di anni fa?

Ci sono le spugne, denominate anche poriferi, che costituiscono un insieme molto eterogeneo e quelle stranissime creature apparentemente molto elementari denominate placozoi. Questi ultimi contengono geni *ParaHox*, mentre le prime spugne analizzate, del tipo delle *Demospongiae*, non mostrano la presenza di geni *Hox* e neppure *ParaHox*. Si suppose allora che nella discendenza di queste famiglie geniche ci fosse una lacuna e si parlò di ipotesi del «gene fantasma». Ora il cosiddetto gene fantasma è stato individuato in un diverso tipo di spugne, le cosiddette *Calcispongiae* (si veda Fortunato S.A.V. e altri, in «Nature», Vol. 514, pp. 620-623). Il lavoro mostra che in questo particolare tipo di spugne ci sono effettivamente geni del tipo *ParaHox*, chiudendo così il cerchio del tracciamento delle discendenze molecolari. L'opera dovrebbe venire definitivamente completata con l'analisi dei genomi di altri tipi di spugne diverse sia dalle *Demospongiae* sia dalle *Calcispongiae*.

L'albero evolutivo di queste famiglie di geni omeobox risulta così confermato, e si collega a grandi linee con il quadro elaborato per le prime creature animali. Probabilmente qualche gene della famiglia *ParaHox* era presente nelle cellule dei primi animali, mentre in certi animali primitivi questi geni sono andati perduti, con successiva semplificazione del processo di sviluppo. Ne consegue che i primi animali avevano uno sviluppo di tipo molto avanzato e complesso. Questa caratteristica è andata perduta in placozoi, ctenofori e alcuni tipi di spugna, e questi animali hanno perso una certa complessità nel processo di sviluppo. Rappresentano quindi una sorta di regresso nell'evoluzione delle strategie dello sviluppo, un esempio istruttivo di perdita di complessità.

Il processo evolutivo insomma non è sempre associato a un aumento di complessità. Ci sono momenti di stasi e addirittura episodi di perdita di complessità, come dimostra anche l'esistenza di numerosissime specie di parassiti obbligati.

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

Difficoltà esponenziali

Alcuni problemi sono semplici da enunciare ma assurdamente difficili da risolvere

Tra le tante curiosità elementari riguardanti i numeri piccoli, una delle più profonde è il fatto che 8 e 9 differiscono per una sola unità. La curiosità risiede nel fatto che 8 è un cubo, e 9 un quadrato: si tratta dunque di due potenze, rispettivamente di 2 e di 3, che insieme forniscono una soluzione all'equazione diofantea esponenziale $3^n - 2^m = \pm 1$. L'aggettivo «diofanteo» indica il tipo di equazioni polinomiali a valori interi studiate da Diofanto verso il 250 della nostra era, mentre «esponenziale» specifica che alcune delle incognite stanno appunto a esponente.

Nel 1343 il talmudista francese Levi ben Gershon, detto Gersonide, dimostrò nell'*Armonia dei numeri* che le uniche altre potenze di 2 e 3 che differiscono per una sola unità sono le coppie (1,2), (2,3) e (3,4), che corrispondono a esponenti banali. Detto altrimenti, l'equazione precedente non ha altre soluzioni non banali, oltre a (8,9).

Il padre di Gersonide si chiamava Catalan, e per ironia della sorte fu proprio il matematico francese Eugène Catalan, nel 1844, a domandarsi se 8 e 9 fossero le uniche due potenze non banali, in qualunque base, che differiscono per una sola unità. La risposta positiva divenne nota come congettura di Catalan, ed è stata confermata soltanto nel 2002 da Preda Mihailescu, con una complicata dimostrazione. In altre parole, a non avere soluzioni non banali oltre a (8,9) non è solo l'equazione precedente, ma anche la più generale $x^n - y^m = \pm 1$.

Mente eccelsa. Srinivasa Ramanujan, uno dei più grandi matematici di sempre, nato nel 1887 e deceduto nel 1920.

Questa situazione è tipica della teoria dei numeri in generale, e delle equazioni diofantee esponenziali in particolare: problemi semplici da enunciare, suggeriti da ovvi esempi, si rivelano assurdamente difficili da risolvere. Il caso più conosciuto è quello dell'ultimo teorema di Fermat, enunciato nel 1637, che richiedeva di determinare per quali esponenti n ci fossero soluzioni intere all'equazione $x^n - y^n = z^n$.

La dimostrazione, come è noto, richiese 350 anni di ricerche e fu trovata da Andrew Wiles nel 1995. Come già per la congettura di Catalan, anche per l'ultimo teorema di Fermat l'unica soluzione risultò quella già nota da tempi immemorabili: il caso dei quadrati e delle terne pitagoriche, come 3, 4 e 5, in cui banalmente 3 al quadrato più 4 al quadrato è uguale a 5 al quadrato.

A un altro esempio famoso si arriva, ancora una volta, partendo da osservazioni a prima vista innocue. Già i Pitagorici avevano introdotto i numeri triangolari, che si possono rappresentare disponendo pallini a triangolo, si generano mediante la formula $z(z + 1)/2$ e sono 1, 3, 6, 10, 15, eccetera. Fu invece padre Marin Mersenne ad attirare, nei *Pensieri fisico-matematici* del 1644, l'attenzione sui numeri che differiscono di un'unità dalle potenze di 2 e si generano mediante la formula $2^m - 1$ e sono 1, 3, 7, 15, eccetera.

Come si vede, 1, 3 e 15 appartengono a entrambe le liste, e sono dunque numeri di Mersenne triangolari. Per trovare anche i rimanenti basta uguagliare le formule che descrivono i numeri triangolari da un lato e i numeri di Mersenne dall'altro. In un paio di passaggi si arriva a un'equazione diofantea esponenziale del tipo $2^{m+3} = (2z + 1)^2 + 7$.

Nel 1913 Srinivasa Ramanujan annunciò, senza dimostrazione, che l'equazione $2^n = x^2 + 7$ ha soluzioni solo per n uguali a 3, 4, 5, 7 e 15, corrispondenti a valori di x pari a 1, 3, 5, 11 e 181. La sua affermazione divenne nota come congettura di Ramanujan, fu riproposta indipendentemente nel 1943 da Wilhelm Ljunggren e dimostrata nel 1948 da Trygve Nagell, entrambi matematici norvegesi.

Per quanto riguarda i numeri di Mersenne triangolari, il valore 3 non è applicabile perché produce un esponente 0. Dai valori 4, 5 e 7 si ricavano gli esponenti 1, 2 e 4, e dunque i numeri 1, 3 e 15, che già conoscevamo. E dal valore 15 si ricavano l'esponente 12 e il numero 4095. Poiché l'equazione di Ramanujan non ha altre soluzioni, la lista 1, 3, 15 e 4095 esaurisce l'insieme dei numeri di Mersenne triangolari. Un altro bell'esempio di problema semplice a soluzione complicata: anzi, si può ben dire, di difficoltà esponenziale.

SPL/Contrasto

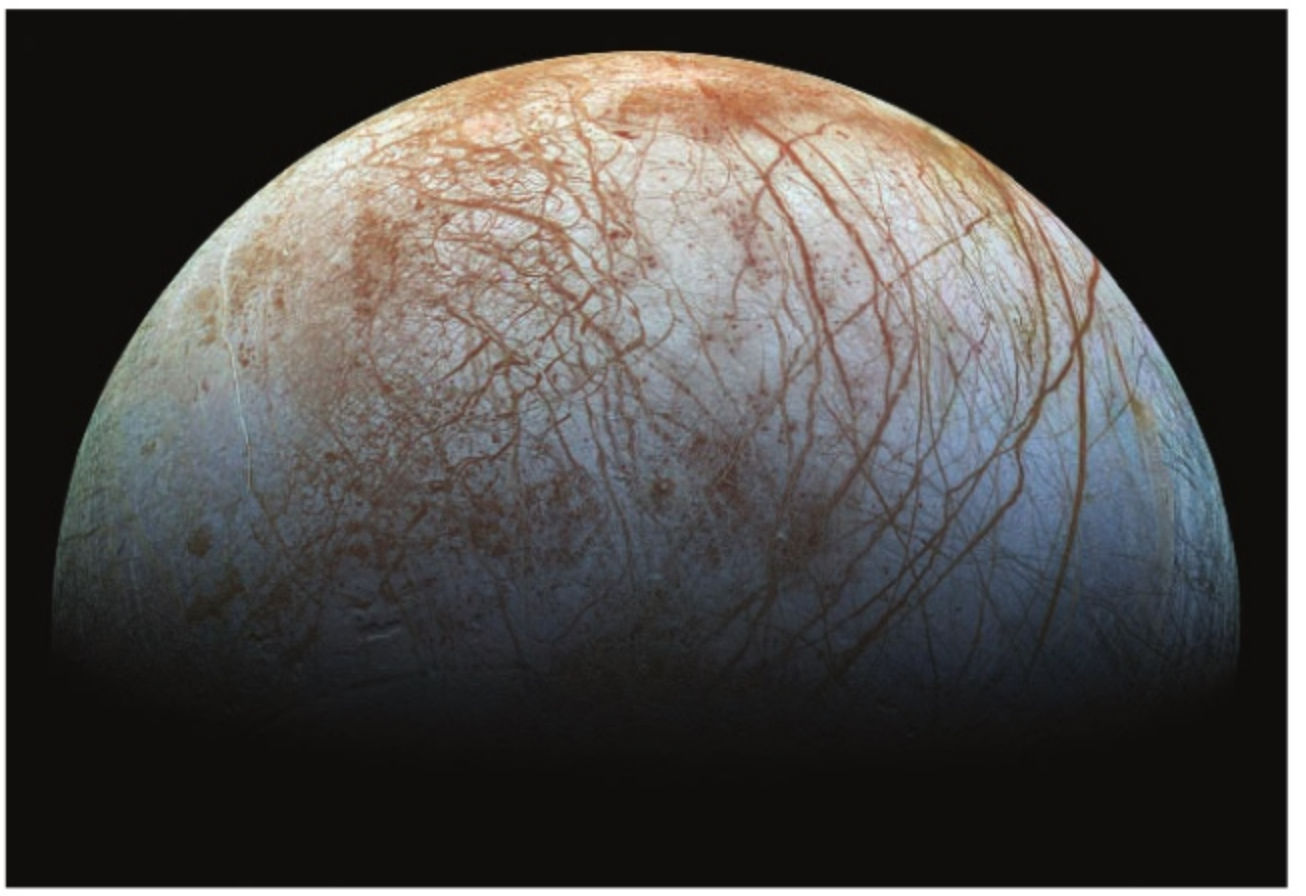
di Amedeo Balbi
Astrofisico, ricercatore al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Obiettivo Europa

La luna di Giove è uno dei bersagli principali per la ricerca di vita nel sistema solare

L'estate scorsa, la NASA ha invitato a sottoporre proposte scientifiche per una possibile futura missione spaziale per l'esplorazione di Europa, una delle quattro lune principali di Giove. È l'ultimo segno, in ordine di tempo, di un interesse sempre maggiore per questo corpo del sistema solare. Grande poco meno della nostra Luna, e quindi privo di fonti di energia interna, e troppo distante dal Sole per esserne riscaldato in maniera sostanziale, Europa ha una superficie coperta completamente dal ghiaccio, e per molto tempo è stato ritenuto morto dal punto di vista geologico. Le prime immagini ravvicinate, scattate negli anni settanta dalle sonde Voyager, lasciarono però intuire per la prima volta una verità molto diversa.

Da un lato, sul ghiaccio erano quasi del tutto assenti i crateri lasciati dall'impatto di meteoriti e asteroidi, segno che il ghiaccio doveva essersi rigenerato di frequente su scale di tempo relativamente brevi; dall'altro, la superficie della luna gioviana appariva attraversata da segni che suggerivano la formazione di spaccature e spostamenti in un guscio rigido, come per la presenza di una sorta di attività tettonica. I modelli teorici mostrarono poi che la forza di marea causata dalla gravità di Giove era in effetti in grado di deformare periodicamente il satellite, generando energia sufficiente non solo a tenerne attiva la crosta, ma forse addirittura a mantenere l'acqua allo stato liquido sotto la superficie. In seguito si sono raccolte prove sufficienti a rendere molto probabile la presenza, sotto i ghiacci di Europa, di un oceano estremamente profondo (un centinaio di chilometri).



Ghiaccio alieno. Europa in un'immagine ottenuta alla fine degli anni novanta dalla sonda Galileo della NASA. In chiaro le aree con maggiore concentrazione di ghiaccio d'acqua.

NASA/JPL-Caltech/SETI Institute

Tutto questo ha fatto sì che Europa sia diventato, negli ultimi anni, uno dei bersagli principali per la ricerca di altre forme di vita nel sistema solare, ricerche incoraggiate anche dall'osservazione, sul nostro pianeta, di interi ecosistemi nelle sacche d'acqua sotto i ghiacci antartici: uno studio pubblicato nel numero di «Nature» del 21 agosto 2014, per esempio, illustrava la scoperta nel lago subglaciale Whillans di quasi 4000 diverse specie di microrganismi chemioautotrofi, in grado cioè di ricavare energia da composti inorganici anziché dalla luce solare o da altri organismi.

Certo, per il momento è fantascientifico immaginare di andare a trivellare il guscio di ghiaccio di Europa (il cui spessore potrebbe andare da alcuni chilometri fino a qualche decina) per vedere che cosa c'è sotto. Ma se invece l'acqua riaffiorasse spontaneamente in superficie, per esempio espulsa sotto forma di getti di vapore? In questo caso se ne potrebbe analizzare la composizione a distanza, o addirittura farla attraversare da una sonda. La presenza di *geyser* è stata osservata ripetutamente dalla sonda Cassini su Encelado, una luna ghiacciata di Saturno, anch'essa dotata molto probabilmente di un oceano subglaciale, stando a quanto ha mostrato l'analisi dei dati gravimetrici raccolti da Cassini (come pubblicato sul numero di «Science» del 4 aprile 2014).

Per quanto riguarda Europa, nel dicembre 2013 lo Hubble Space Telescope aveva osservato un apparente sbuffo di vapore proveniente dalla regione polare meridionale del satellite. L'evento però non si è più verificato, e nel frattempo sono sorti dubbi sul fatto che fosse effettivamente causato dal riaffiorare di vapore sotterraneo. Lo scorso anno, uno studio basato sui dati raccolti proprio dalla sonda Cassini nel 2001 e pubblicato su «The Astrophysical Journal» il 20 dicembre non ha trovato prove della presenza di getti di vapore su Europa, ma Hubble continua a osservare il satellite, per capire se si era trattato di un falso allarme o se i getti sono semplicemente molto rari.

In ogni caso, che ci siano o no dei geyser su Europa, resta il fatto che andare a studiare meglio che cosa succede in quel lontano mondo di ghiaccio sarebbe incredibilmente interessante.

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

Nuovo quadro per *Homo antecessor*

Studi recenti suggeriscono una nuova relazione tra questa specie estinta e la nostra

Qualcuno dei lettori si ricorderà che mesi fa parlavamo di *Homo antecessor*. Si tratta di poco meno di un centinaio di fossili a cui è stato attribuito questo nome. Fossili frammentari, da un lato, ma assai rappresentativi di vari distretti scheletrici dall'altro. Furono rinvenuti a partire dalla prima metà degli anni novanta del secolo scorso negli strati profondi di uno dei formidabili giacimenti carsici della Sierra de Atapuerca, a Burgos, in Spagna: la Gran Dolina.

Intorno a quei reperti, datati a più di 780.000 anni dal presente, si sono articolati diversi dibattiti degli ultimi vent'anni: sia le questioni riguardanti una delle prime ondate di popolamento delle terre a nord del Mediterraneo, sia il risvolto invero inquietante del più antico episodio documentato di cannibalismo, sia l'ipotesi secondo cui quei resti possano rappresentare la specie ancestrale alla divergenza tra la linea evolutiva che porterà in Europa alla caratterizzazione di *Homo neanderthalensis* e quella che vedrà in Africa l'emergere di *Homo sapiens*. A quest'ultimo riguardo abbiamo anche detto che ormai non esiste (in realtà non è mai esistito davvero) un consenso nella comunità scientifica, mentre per la stessa posizione filogenetica ha più credito la specie *Homo heidelbergensis*, di cui pure abbiamo parlato e riparleremo.

Gli stessi ricercatori spagnoli non difendono più la loro stessa proposta, e fra i motivi del cambiamento di linea ci sono gli argomenti che ruotano intorno a una faccia di bambino. È infatti proprio sulla base di uno dei reperti della Gran Dolina, di certo il più noto – la pozione di ossa facciali di un ragazzetto di meno di 12 anni, che porta la sigla ATD6-69 e viene solitamente associata a un osso frontale frammentario (ATD6-15) in modo da formare una sorta di «maschera facciale» infantile – che i ricercatori spagnoli basarono la principale delle loro ipotesi alla fine del secolo scorso.

Mi ricordo ancora quando me la mostrarono per la prima volta nel laboratorio da campo di Burgos, quella faccia di bambino. Mi pare fosse il 1996. Aprendo la scatola che la conteneva provvisoriamente, Juan Luis Arsuaga mi chiese: «Dimmi un po', che cosa ti sorprende in questo reperto se ti dico che viene dagli strati della Gran Dolina?». La risposta era quasi ovvia, visto che avevo davanti qualcosa che incredibilmente ricordava la morfologia moderna, ma che era appartenuta a una creatura di quasi un milione di anni fa, riferibile a una specie per altri versi piuttosto differente da noi. Una deduzione sembrava allora ragionevole: quella specie aveva acquisito una forma della regione facciale infantile che si sarebbe poi mantenuta nell'adulto della nostra. *Homo antecessor* sarebbe stato dunque l'antenato fondamentale di *Homo sapiens*; anche se i suoi resti si trovano al momento solo in Spagna (e la nostra specie si è originata in Africa); anche se ha quasi un milione di anni...

Diverse ricerche di questi ultimi anni hanno modificato questo quadro interpretativo, a partire proprio da studi che si sono concentrati su ontogenesi e filogenesi della morfologia facciale nel genere *Homo*.

Dalla Gran Dolina. Alcuni dei fossili scoperti a metà degli anni novanta in un giacimento carsico della Sierra de Atapuerca, in Spagna, e attribuiti a *Homo antecessor*.

Javier Trueba/Msf/SPL/Contrasto

Detto in breve, in un articolo del 2013 pubblicato sul «Journal of Human Evolution» e in altri lavori (fino all'ultimo di un paio di mesi fa) è stato mostrato che le caratteristiche apparentemente moderne di ATD6-69 possano essere interpretate come parte di una morfologia facciale primitiva del genere *Homo*, correlata con la taglia dell'intera regione facciale e conservatasi con modalità differenti nelle forme umane successive, fra le quali vanno annoverate sia *Homo antecessor* che *Homo sapiens*. Questo dimostrerebbe che non necessariamente la prima specie è stata antenata della seconda, ma semplicemente che entrambe hanno avuto un antenato comune.

E questo, francamente, un po' ce lo aspettavamo.

ENERGIA

L'incerto futuro di ITER

Ombre sulla partecipazione degli Stati Uniti al progetto internazionale

Il destino di ITER, gigantesco reattore sperimentale per la fusione nucleare (nella foto una veduta aerea del sito di costruzione a Cadarache, in Francia), potrebbe cambiare radicalmente se Washington decidesse di reindirizzare i propri investimenti su progetti nazionali.

Lesenchal/Ppv-Aix.com/ITER Organisation

Il futuro della ricerca sulla fusione nucleare negli Stati Uniti è complesso, e la partecipazione del paese ai progetti internazionali dipenderà anche da quanto i fisici che dirigono le agenzie federali per la ricerca saranno in grado di rassicurare sia la comunità scientifica sia la politica. Il Department of Energy, il ministero statunitense che si occupa delle questioni energetiche, è sotto accusa per la scarsa trasparenza del suo programma sulla fusione – FES (Fusion Energy Research) – e in particolare per il ruolo del direttore Edmund Synakowski. Un articolo sulla rivista «Science» cita fisici statunitensi secondo cui il programma è «disfunzionale, guasto e in preda allo scompiglio».

Il programma gode di un budget molto ampio con cui gestisce diversi progetti di ricerca sulla fusione nucleare. In un rapporto pubblicato a ottobre, una commissione interna ha suggerito di spegnere immediatamente il reattore in funzione al MIT di Boston, e nei prossimi anni gli altri tre reattori a fusione degli Stati Uniti, per concentrarsi su un unico progetto di ricerca multimiliardario: la costruzione di una nuova centrale a fusione chiamata Fusion Nuclear Science Facility (FNSF). Il rapporto ha attirato critiche per la sua parzialità e incompletezza. Inoltre vari membri della commissione non hanno potuto partecipare alla sua stesura: diversi avevano conflitti di interesse e sono stati esclusi dal voto finale.

Nel frattempo le due Camere degli Stati Uniti hanno votato per rinnovare, almeno per quest'anno, il finanziamento di 225 milioni di dollari a ITER, il gigantesco progetto di un reattore sperimentale per dimostrare la fattibilità e sostenibilità della fusione nucleare, attualmente in costruzione in Francia.

Nel 2006 gli Stati Uniti avevano firmato un accordo che li impegnava a contribuire con circa il 9 per cento dei costi del reattore, a cui contribuiscono Unione Europea, Russia, Cina, India, Giappone e Corea del Sud. Al Senato è stato scongiurato il pericolo di un voto che cancellava completamente i finanziamenti. il Congresso ha invece votato il rifinanziamento e persino un aumento dei fondi richiesti dal governo.

Tuttavia il compromesso raggiunto al Congresso destina gran parte dei fondi stanziati all'acquisto di attrezzature da aziende statunitensi anziché alla direzione centrale di ITER. La proposta bipartisan di cancellazione dei finanziamenti puntava a risparmiare da 3 a 6 miliardi di dollari da reinvestire in progetti nazionali. L'incertezza sulle cifre è dovuta all'incapacità del Department of Energy – e non solo – di stimare con esattezza i costi di ITER: non è tuttora chiaro quando potrà entrare in funzione il reattore, e a quali costi.

Alessandro Delfanti

FISICA TEORICA

Le due facce della medaglia quantistica

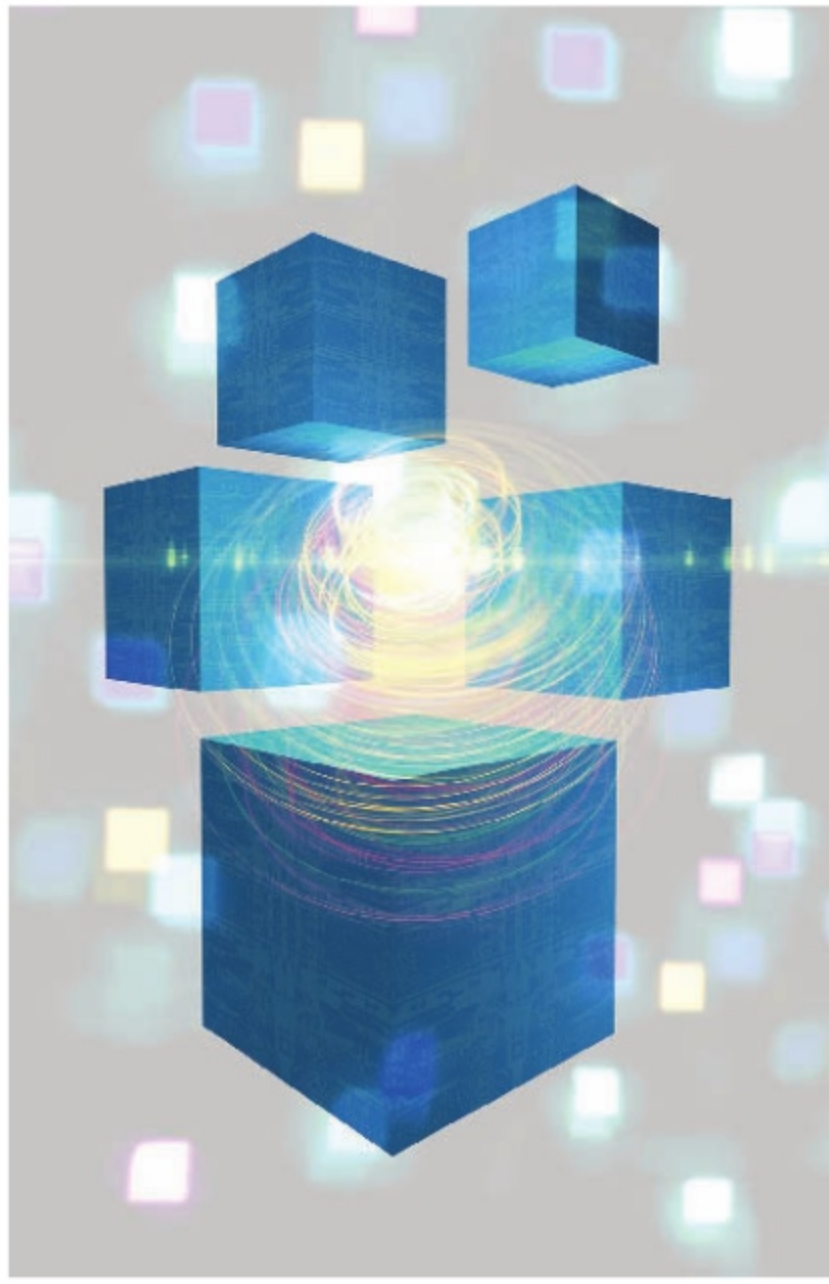
Due concetti di base della meccanica quantistica non sarebbero indipendenti, ma equivalenti

Il dualismo onda-particella e il principio di indeterminazione sono due facce della stessa medaglia. A sostenerlo su «Nature Communications» è un gruppo di fisici guidato da Patrick Coles, della National University of Singapore. I ricercatori hanno dimostrato che questi due concetti fondamentali della meccanica quantistica, inizialmente considerati indipendenti, sono in realtà equivalenti, grazie a una particolare formulazione matematica del principio di indeterminazione. In particolare, Coles e colleghi hanno sviluppato il formalismo delle relazioni di indeterminazione nella loro versione «entropica» per scoprire che con quello stesso formalismo è possibile descrivere in maniera diretta anche il dualismo onda-particella, fenomeno la cui formulazione matematica rigorosa era stata sino a oggi argomento di dibattito.

Il dualismo onda-particella consiste nel fatto che talvolta un oggetto quantistico si comporta come un'onda che si propaga nello spazio, altre volte come una particella, ovvero un oggetto corpuscolare che obbedisce alle leggi della meccanica classica. Sia per i fotoni sia per gli elettroni, questo dualismo emerge in maniera evidente nel celebre esperimento della doppia fenditura: sparando un fotone o un elettrone alla volta, sul bersaglio oltre le due fenditure si osservano dapprima gli esiti dei singoli impatti, ma con l'aumentare del numero di lanci si evidenzia la formazione delle figure d'interferenza tipiche di un fenomeno ondulatorio.

Nella sua formulazione tradizionale, il principio di indeterminazione afferma invece l'impossibilità di conoscere simultaneamente con la stessa precisione coppie di grandezze osservabili associate a una certa particella, per esempio la posizione e la quantità di moto (il prodotto della massa per la velocità della particella). Tuttavia nella sua formulazione entropica – una versione moderna del formalismo – questo evidenzia i limiti connessi alla quantità di informazione che si è in grado di ottenere da un sistema fisico, facendo emergere che il dualismo onda-particella è proprio un modo per evidenziare questi limiti. Una scoperta che, secondo gli autori, potrà aumentare anche la sicurezza della crittografia quantistica.

Emiliano Ricci



Dallo champagne alle centrali elettriche

È importante nei brindisi di Capodanno, ma anche nelle centrali elettriche. La formazione delle bolle in un liquido è un problema fisico di grandissimo interesse, che ha notevoli applicazioni ingegneristiche.
Si tratta però di un fenomeno così complesso da non essere mai stato studiato in gran dettaglio. Un nuovo importante passo avanti è stato compiuto ora dai ricercatori delle Università di Tokyo, Kyushu e dal RIKEN Institute, in Giappone, che hanno studiato il fenomeno grazie a K, uno dei supercomputer più potenti al mondo, ospitato al RIKEN. Lo studio, pubblicato sul «Journal of Chemical Physics», si basa su simulazioni molecolari senza precedenti, e ha mostrato che la formazione delle bolle è governata da leggi molto simili a quelle della condensazione di un gas.
Quando stappiamo lo champagne, il calo improvviso di pressione genera una grande quantità di bollicine che si aggregano a formare bolle più grandi, secondo la cosiddetta «maturazione di Ostwald», un processo presente anche nelle turbine delle centrali elettriche, dove l'acqua viene convertita in un getto d'aria calda.
«Serve un numero enorme di molecole per simulare le bolle, dell'ordine di 10.000 per descriverne una», ricorda Hiroshi Wanatabe, primo autore dello studio. Per questo gli autori hanno sfruttato K, per produrre una simulazione con 700 milioni di molecole. Il lavoro ha mostrato che la dinamica di formazione delle bolle segue la teoria LSW, sviluppata dai fisici Lifshitz, Slyozov e Wagner negli anni sessanta per descrivere la condensazione delle gocce nei liquidi e la crescita dei cristalli di ghiaccio.
La scoperta ha interessanti applicazioni ingegneristiche: gli autori stanno studiando una soluzione polimerica da sfruttare nelle turbine per ottimizzare la formazione delle bolle e migliorare l'efficienza delle centrali.

Massimiliano Razzano

Victor Habbick Visions/Science Photo Library/Corbis (*meccanica quantistica*); Diana Miller/cultura/Corbis (*bolle*)

FISICA

Grandi opere per la fisica cinese

Il laboratorio sotterraneo sotto il monte Jinping diventerà uno dei più grandi del mondo

Cortesia Tsinghua University Beijing/Max-Planck-Institut fuer Physik

La Cina continua la corsa per affermarsi come gigante della ricerca scientifica. Il laboratorio sotterraneo di Jinping (CJPL), che già detiene il primato di laboratorio più profondo del mondo, sta infatti iniziando i lavori di ampliamento che lo trasformeranno in uno dei più grandi.

Il CJPL si trova sotto il monte Jinping, nella Provincia del Sichuan, sotto 2400 metri di rocce che lo schermano dalla radiazione cosmica di fondo, cioè la radiazione residua del big bang. Dal 2010 si occupa principalmente di ricerca sulla materia oscura, che è la parte di materia dell'universo che non emette radiazioni elettromagnetiche e quindi non è osservabile se non tramite i suoi effetti gravitazionali. In particolare ospita gli esperimenti PandaX (Particle and Astrophysical Xenon) e CDEX (China Dark Matter Experiment); con tecniche diverse, entrambi puntano a individuare la materia oscura rivelando l'esistenza, finora solo postulata, di particelle massive debolmente interagenti (WIMP).

Con le quattro nuove caverne lunghe 130 metri e alte 13 metri, per un totale di 120.000 metri cubi, il CJPL diventerà il secondo laboratorio sotterraneo più grande del mondo dopo i Laboratori nazionali del Gran Sasso, che arrivano a 180.000 metri cubi. Il nuovo CJPL potrà ospitare rivelatori di dimensioni maggiori e più sensibili, che potrebbero entrare in funzione dalla fine del 2016, rendendolo competitivo a livello globale.

PandaX punta a costruire un gigantesco rivelatore da 20 tonnellate di xeno, l'elemento usato per rivelare le particelle WIMP. La struttura è nata in modo fortuito: nel 2008 il fisico Qian Yue scoprì l'esistenza di tunnel scavati nella montagna per un progetto idroelettrico, e ottenne che fossero scavate due sale aggiuntive per il laboratorio. Dato che il CJPL ha accessi orizzontali tramite i tunnel scavati sul fianco del monte Jinping, il materiale può essere trasportato su camion, a differenza di altri laboratori simili nel resto del mondo. Inoltre, grazie alla concomitanza degli scavi per la diga (*nella foto*), il costo della sua espansione sarà limitato a circa 40 milioni di euro.

Alessandro Delfanti

La nuova frontiera degli acceleratori

Economici, di ridotte dimensioni e capaci di spingere le particelle a velocità sempre più alte. Sono i nuovi acceleratori al plasma *wakefield*, che in appena sei metri di lunghezza riescono a portare un fascio di elettroni a livelli d'energia di solito raggiungibili in un acceleratore lineare standard di almeno tre chilometri.

La *plasma wakefield acceleration* è una tecnica studiata e continuamente perfezionata da circa 35 anni, ma solo ora i ricercatori sono riusciti a superare anche i problemi di efficienza riscontrati negli esperimenti degli ultimi anni. Nello studio, pubblicato su «Nature», gli autori hanno migliorato la performance della tecnica agendo direttamente sulla forma del fascio di elettroni che veniva accelerato dal flusso di plasma bollente. Aumentando la precisione del macchinario, le onde di plasma sono state in grado di accelerare pacchetti di elettroni fino a energie dalle 400 alle 500 volte superiori a quelle che avrebbero raggiunto in un acceleratore tradizionale della stessa lunghezza, mantenendo inoltre una bassa dispersione di energia.

A detta dei ricercatori, la tecnica potrebbe essere il prototipo di una nuova generazione di acceleratori che interesserebbe anche l'area medica e industriale, superando i limiti della ricerca di base.

Mattia Maccarone

CLIMA

Senza alberi, poca agricoltura

La deforestazione influisce in modo negativo sulle rese dei raccolti

Jason Edwards/National Geographic Society/Corbis

La deforestazione è un fenomeno in atto in parecchie zone del mondo e non accenna a ridursi. In particolare, in molti paesi in via di sviluppo le foreste vengono tagliate spesso in maniera radicale, certamente per sfruttare il legname ma, soprattutto, per far posto a coltivazioni, al fine di sfamare una popolazione sempre più numerosa. Dunque, alla diminuzione delle foreste ci si dovrebbe attendere un aumento delle terre coltivabili e dei raccolti. Purtroppo però questo fenomeno porta con sé alcune conseguenze su altri fenomeni, quelli atmosferici, che possono ridurre, se non addirittura annullare, questo presunto vantaggio.

In un articolo pubblicato su «Nature Climate Change» Deborah Lawrence e Karen Vandecar dell'Università della Virginia hanno fatto il punto su quanto sappiamo dei rapporti tra deforestazione e agricoltura. In particolare, l'uso di modelli climatici permette di eseguire esperimenti numerici che non possono essere effettuati nella realtà. Le due ricercatrici hanno così indagato che cosa succederebbe nei casi estremi di completa deforestazione dell'Amazzonia e delle foreste africane e tropicali in genere, ma hanno anche considerato gli effetti di una deforestazione più parziale.

In tutti i casi si vede chiaramente che alla deforestazione corrisponde un aumento di temperatura: per il caso di deforestazione totale si avrebbe addirittura un effetto di aumento equivalente a quello dovuto a tutte le combustioni fossili avvenute a partire dal 1850. Allo stesso tempo si sono evidenziate anche soglie critiche di deforestazione oltre le quali la pioggia diminuisce in maniera consistente, o cade più violentemente senza essere assorbita.

Questi effetti si osservano direttamente nei territori deforestati, ma anche a grande distanza da dove avviene la deforestazione: casi particolari sono stati studiati per il Midwest degli Stati Uniti, zona di forte produzione agricola. Nei paesi tropicali o subtropicali questi cambiamenti possono sicuramente portare alla perdita, totale o parziale, dei raccolti, con conseguenze spesso tragiche per la popolazione locale, legata strettamente a un'agricoltura di sussistenza.

Antonello Pasini

I rifiuti speciali e pericolosi in Italia

Il rapporto sui rifiuti speciali pubblicato di recente dall'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) ha analizzato produzione e trattamento dei rifiuti speciali (quelli di industrie e aziende, smaltiti da imprese private) in Italia, rilevando che fra il 2011 e il 2012 sono diminuiti del 2,1 per cento, in termini assoluti una diminuzione di 134,4 milioni di tonnellate, mentre quelli pericolosi sono aumentati dell'8,1 per cento, pari a 9,4 milioni di tonnellate. Visto che il 41,3 per cento dei rifiuti speciali non pericolosi è costituito da calcinacci e il 24,5 per cento sono scarti industriali è facile capire che crisi di edilizia e manifatturiero spiegano gran parte del calo. Sembra contraddittorio, invece, l'aumento della quantità di rifiuti pericolosi (per il 40 per cento industriali). Ma visto che il 19 per cento è costituito da vecchie automobili, apparecchiature elettroniche e batterie, a spiegare l'aumento dei rifiuti pericolosi potrebbe essere proprio la crescita del corretto smaltimento di questi prodotti. A conferma di questo, c'è un dato positivo: nel 2012 solo l'8,4 per cento dei rifiuti speciali è finito tal quale in discarica, un calo del 15,9 per cento sul 2011. Il 62,1 per cento è stato recuperato, il 14 per cento è stato trattato, il 12,5 per cento è stato stoccato. Però è finito in discarica anche un milione di tonnellate di rifiuti pericolosi, di cui il 41 per cento in impianti non specifici, e un altro milione di tonnellate è stato esportato.

Alex Saragosa

BIOLOGIA

Le staminali che non ti aspetti

Cellule adulte di topo sono state riprogrammate in un nuovo tipo di staminali chiamate cellule F

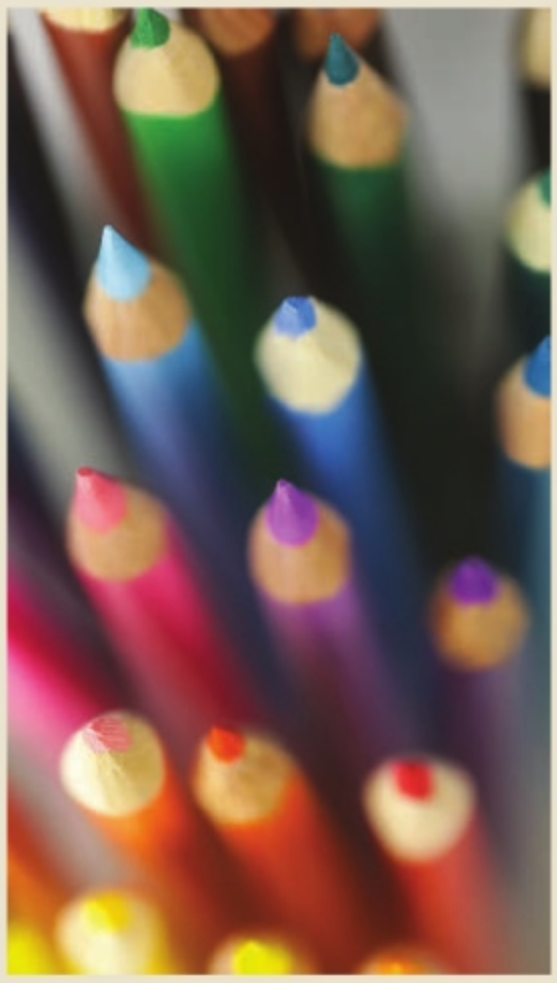
Le staminali ricavate dagli embrioni e quelle finora ottenute riprogrammando cellule adulte (le staminali pluripotenti indotte o cellule iPS) non esauriscono il repertorio delle cellule pluripotenti, capaci di differenziarsi in ogni tipo di tessuto. Un nuovo tipo di staminali pluripotenti di topo è stato presentato in cinque lavori su «Nature» e «Nature Communications», mostrando come la pluripotenza sia un fenomeno complesso e ancora poco compreso.

Da quando nel 2006 Shinya Yamanaka ricavò per la prima volta le iPS, trattando cellule adulte con quattro fattori di trascrizione, il metodo si è dimostrato riproducibile e affidabile, ma i suoi meccanismi molecolari sono stati chiariti solo per le fasi iniziali. Dopo alcuni giorni di intensa riprogrammazione delle modifiche epigenetiche che regolano l'espressione genica, le cellule entrano in uno stallo da cui, dopo una settimana, solo una minima frazione esce divenendo pluripotente, mentre le altre restano in vari stati di riprogrammazione parziale. Per capire che cosa accade in questa settimana e perché gli esiti siano così eterogenei, nel 2010 una vasta collaborazione internazionale ha lanciato il Project Grandiose, che analizza come variano momento per momento i profili epigenetici e la sintesi di RNA e proteine di milioni di cellule riprogrammate.

I primi risultati sono stati pubblicati in questa serie di articoli, che ha illustrato i passaggi molecolari di una serie di percorsi di ringiovanimento che portano a diversi stati di pluripotenza, fra cui le nuove «cellule F», presentate da Andras Nagy del Mount Sinai Hospital di Toronto. La F sta per *fuzzy*, cioè «confuso»: queste cellule si creano quando i quattro fattori di Yamanaka agiscono più a lungo rispetto al protocollo classico, e proliferano più in fretta formando colonie sfilacciate. Potrebbero quindi essere indicate per future terapie in cui servano grandi quantità di cellule.

Anche in chiave terapeutica, comunque, i progressi più importanti sono quelli che si stanno facendo nel capire i dettagli molecolari della riprogrammazione e come controllarla, per ricavare cellule dal comportamento prevedibile.

Giovanni Sabato



Pasquale Sorrentino/SPL/Contrasto (*provetta*); Anette Jäger/ImageBROKER/Corbis (*matite colorate*)

La conquista di un mondo a colori

Dalla prima comparsa di fotorecettori in grado di percepire i colori, intorno a 300 milioni di anni fa, come dimostrato dalla presenza negli occhi di *Acanthodes bridgei*, pesce fossile descritto di recente su «Nature Communication», la visione cromatica del mondo ha accompagnato da sempre l'evoluzione dei vertebrati. Nonostante l'origine molto antica, in numerosi gruppi animali questa capacità è stata però perduta nel tempo, per poi essere riacquisita in fasi successive. Un caso esemplare di questo tipo sono i mammiferi, i cui antenati comuni avevano una visione di fatto bicromatica del mondo, dovuta alle loro abitudini notturne, ma che oggi sono caratterizzati da diverse capacità di visione dei colori.

Uno studio su «PLoS Biology» ha ricostruito il percorso di evoluzione molecolare che ha portato da una vista basata sulla percezione di frequenze luminose nel rosso e nell'ultravioletto, tipica dei primi mammiferi, a quella tricromatica (rosso-blu-verde) che caratterizza esseri umani e scimmie antropomorfe. La capacità di percepire le frequenze nell'intero spettro del visibile fu acquisita nella nostra linea evolutiva tra 80 e 30 milioni di anni fa, con la conversione delle opsine, i pigmenti che si trovano nei fotorecettori, sensibili alla luce UV in altre sensibili alla luce blu. Confrontando i geni che codificano per le opsine di numerose specie animali e studiando le interazioni fra i loro prodotti e la luce, sono state realizzate in laboratorio le proteine estinte delle specie intermedie, scoprendo che questo passaggio funzionale avvenne in seguito a sette mutazioni, l'ultima delle quali tra 45 e 30 milioni di anni fa.

La sensibilità alla luce verde nella nostra linea evolutiva risale invece a circa 30 milioni di anni fa, ed emerse quando si verificò una duplicazione del gene che codifica per le opsine sensibili al rosso e dopo che una delle due copie subì una mutazione che la rese sensibile alla luce di questo colore.

Andrea Romano

I costi delle resistenze

Oggi uccidono 700.000 persone all'anno, di cui 50.000 in Occidente. Nel 2050, se non si farà niente per evitarlo, le vittime saranno 10 milioni all'anno, più di quelle oggi mietute da cancro e incidenti stradali insieme. E le perdite per i soli danni diretti si aggireranno intorno al 3 per cento del prodotto interno lordo mondiale. Si parla delle resistenze agli antimicrobici di sei grandi patogeni (*Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli*, HIV, malaria e tubercolosi), secondo il rapporto *Antimicrobial Resistance: Tackling a Crisis for the Health and Wealth of Nations*. Il documento è parte di una serie di studi in corso commissionati dal governo britannico a un gruppo guidato dall'economista Jim O'Neill, già alla Goldman Sachs, che si concluderà con le raccomandazioni di interventi. Le stime sono inevitabilmente approssimative e il quadro andrà raffinato, ma l'entità del problema impone di superare la distrazione della politica e avviare azioni decise, commenta «The Lancet» in un editoriale. I pericoli, altrimenti, potrebbero andare molto oltre i numeri citati: la medicina rischia di regredire di secoli, perché il rischio d'infezione renderebbe di fatto impraticabili molti interventi chirurgici non vitali. (**GiSa**)

L'epigenetica della ginnastica

Per tre mesi, una ventina di giovani è andata quattro giorni a settimana al Karolinska Institut di Stoccolma a pedalare per tre quarti d'ora con una gamba sola. L'espediente aveva un motivo preciso: studiare gli effetti epigenetici dell'esercizio fisico sul tessuto muscolare confrontando le due gambe della stessa persona, così da pareggiare gli influssi della dieta e dei tanti altri fattori che confondono le osservazioni.

Nei muscoli allenati – spiegano su «Epigenetics» i ricercatori, fra cui l'italiano Francesco Marabita – sono cambiate in modo netto e coerente la metilazione e l'attività di oltre 4000 geni, molti dei quali coinvolti nel metabolismo dei carboidrati, nell'adattamento allo sforzo e nell'infiammazione. I benefici dell'attività fisica sotto questi aspetti sono ben noti e lo studio apre una via importante alla loro comprensione, mostrando come i profili di espressione dei geni coinvolti slittino in modo coordinato.

A livello genetico, per esempio, un dato inatteso è che molte modifiche riguardano i cosiddetti *enhancer*, regioni regolatorie lontane dai geni in questione. Si è già visto inoltre che le metilazioni differiscono fra uomini e donne, e i ricercatori vogliono ora verificare se gli effetti siano diversi con altri tipi di attività e come durino o svaniscano al cessare dell'esercizio. (**GiSa**)

Il genoma del cavallo

Il cavallo ha contribuito a plasmare la civiltà umana, a sua volta l'essere umano ha rimodellato il cavallo per le proprie esigenze. La domesticazione, avvenuta negli ultimi 5500 anni, ha lasciato firme genetiche specifiche, come mostra un articolo sui «Proceedings of the National Academy of Sciences».

Un gruppo internazionale di ricerca ha confrontato i genomi di due cavalli di 16.000 e 43.000 anni fa, che vivevano in Russia, con quelli del cavallo di Przewalski (gli ultimi cavalli selvaggi mongoli) e di cinque razze domestiche. Sono stati identificati 125 geni selezionati con la domesticazione e coinvolti in caratteristiche fisiche e comportamentali, come sviluppo di muscoli e ossa, e docilità. Lo studio rivela anche i costi del processo, come l'accumulo di mutazioni dannose per l'elevata consanguineità. A sorpresa, dal 13 al 60 per cento del genoma del cavallo moderno è stato acquisito dall'incrocio con una popolazione selvatica ormai estinta. (**EuMe**)

Il ritorno dei predatori in Europa

Almeno in Europa, esseri umani e grandi carnivori possono convivere negli stessi luoghi senza grossi problemi. A sostenerlo è uno studio su «Science», frutto di una collaborazione internazionale e coordinato da ricercatori di «La Sapienza» Università di Roma, che ha analizzato distribuzione e andamenti demografici nel corso del XXI secolo dei quattro principali carnivori europei: orso, lupo, lince e ghiottone. Dai risultati emerge infatti che circa un terzo dell'Europa continentale ospita almeno una di queste specie con popolazioni stabili o in crescita.
Questa situazione positiva, impensabile fino a pochi decenni fa, è l'esito delle politiche di conservazione messe in atto a livello comunitario, basate su una mirata legislazione e sul parere favorevole dell'opinione pubblica, fattori favoriti dall'ormai consolidata stabilità politica dell'area. Nonostante il disastro compiuto dalla nostra specie nei secoli scorsi, c'è quindi ancora speranza per la conservazione della biodiversità, non solo mediante l'istituzione di luoghi *ad hoc* in cui gli animali possono vivere lontano dalla presenza dell'essere umano come avviene negli altri continenti, ma anche in territori ad alta densità umana. L'Europa potrebbe quindi diventare un esempio mondiale per questo importante aspetto che riguarda il futuro di tutti. (**AnRo**)

GARO/phanie/Phanie Sarl/Corbis (*pillole*); Silke Klewitz-Seemann/imageBROKER/Corbis (*cavallo*); Jasper Doest/Minden Pictures/Corbis (*lupi*)

La muraglia verde

Per contrastare la desertificazione del nord-ovest del paese e le tempeste di sabbia del Gobi, che colpiscono Pechino, i cinesi hanno dato il via nel 1978 al progetto «Grande muraglia verde»: una distesa di 100 miliardi di alberi, piantati lungo una fascia di 4500 chilometri, da completare entro il 2050. Il geografo Minghong Tan, dell'Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research di Pechino, ha fatto, sulla rivista «Land Use Policy», un primo bilancio dell'immenso lavoro.

Analizzando i dati su precipitazioni e tempeste di sabbia e le immagini satellitari, il ricercatore ha scoperto che nel corso degli ultimi trent'anni le piogge nelle zone rimboschite sono aumentate e le tempeste di polvere diminuite, mentre le immagini satellitari più recenti mostrano come l'area verde si accresca e si consolidi. Considerato questo successo, l'Unione Africana vorrebbe ora fare qualcosa di simile nel Sahel. (**AlSa**)

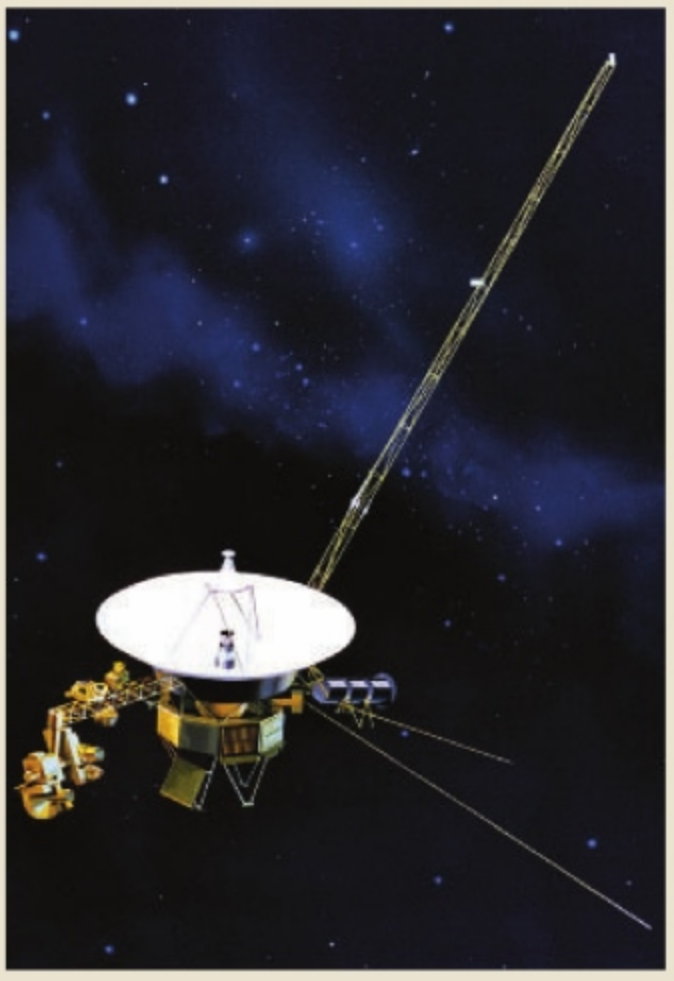
Quella leggerezza dello scheletro umano

Rispetto a scimpanzé e specie umane estinte, il nostro scheletro è gracile, con una massa ossea ridotta in rapporto alla taglia. Ma non si tratta di una adattamento intrinseco della nostra specie, bensì di una conseguenza, presumibilmente indesiderabile, dello stile di vita. Nell'evoluzione infatti lo scheletro di *Homo sapiens* è rimasto a lungo simile a quello degli altri primati, per perdere consistenza solo di recente, in concomitanza con il passaggio dalla vita movimentata dei cacciatori-raccoglitori a quella stanziale degli agricoltori. Lo mostrano due studi sui «Proceedings of the National Academy of Sciences».

Habiba Chirchir, della Smithsonian Institution di Washington, ha esaminato l'osso trabecolare degli arti di scimpanzé, esseri umani e molti ominini fossili, constatando che la densità ossea non è diminuita gradualmente, né con eventi come il passaggio alla stazione eretta, ma è calata repentinamente nei *sapiens* più recenti, soprattutto nelle gambe. Ciò fa pensare che il calo sia legato alla vita sempre più stanziale iniziata con l'avvento dell'agricoltura, idea corroborata da Timothy Ryan della Pennsylvania State University: fra quattro popolazioni umane preistoriche, quelle di raccoglitori hanno un'anca simile agli altri primati, molto più robusta che in quelle agricole. (**GiSa**)

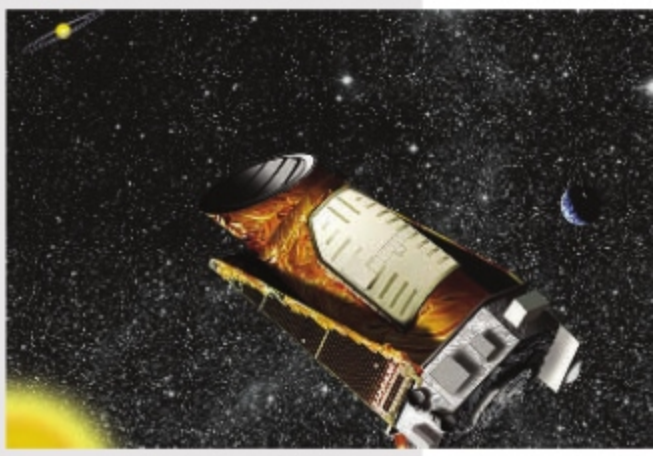
Voyager 1 colpita da tsunami solari

Lanciata nel 1977, la sonda Voyager 1 si trova a circa 130 unità astronomiche dal Sole (un'unità astronomica è circa 150 milioni di chilometri) e oggi è l'oggetto artificiale più distante dalla Terra. Nonostante già da agosto 2012 si trovi nello spazio interstellare, avendo attraversato l'eliopausa, la regione di confine dello spazio attorno al Sole dove il vento solare non è più in grado di frenare i venti stellari provenienti dalle stelle circostanti, risente ancora degli effetti del Sole.
Negli ultimi anni Voyager 1 è stata investita da tre onde d'urto causate da espulsioni coronali di massa provenienti dalla superficie della nostra stella, l'ultima delle quali si è dimostrata particolarmente duratura: da febbraio a novembre 2014. Le onde di pressione generate dal plasma espulso dal Sole arrivano dopo un anno a perturbare il plasma interstellare. Questi risultati, presentati da Don Gurnett, dell'Università dell'Iowa, all'American Geophysical Union Meeting svoltosi di recente a San Francisco, mostrano anche che il secondo tsunami – da aprile a maggio 2013 – ha confermato l'effettivo attraversamento dell'eliopausa da parte della sonda. (**EmRi**)



La nuova vita di Kepler

Il cacciatore di pianeti della NASA, il telescopio spaziale Kepler, inaugura il suo nuovo ciclo di vita con una scoperta. L'ultimo a cadere nella sua rete si chiama HIP 116454b, ha un diametro 2,5 volte quello della Terra e si trova nella Costellazione dei Pesci, a 180 anni luce di distanza dal sistema solare. Il nuovo pianeta, che orbita in appena nove giorni attorno a una stella più calda e più piccola del Sole, è probabilmente troppo arroventato per ospitare la vita. Per osservare nuovi



pianeti, il telescopio spaziale della NASA sfrutta il transito di questi mondi lontani davanti alle loro stelle, un evento che ne provoca una riduzione di luminosità che, seppur lieve, Kepler è in grado di rilevare, grazie alla stabilità del suo sistema di puntamento.
La scoperta, pubblicata su «The Astrophysical Journal», è il primo risultato della nuova missione, battezzata K2, che estende la sua caccia non solo ai pianeti simili alla Terra, ma anche all'osservazione di ammassi stellari, galassie e supernove. Un altro importante compito di Kepler sarà selezionare i pianeti per il nuovo telescopio spaziale James Webb, il successore di Hubble, che analizzerà le loro atmosfere a caccia di possibili firme della vita. (**DaPa**)

Imaginechina/Corbis (*Cina, muraglia verde*); cortesia NASA/JPL (*Voyager*); cortesia NASA/Ames/JPL-Caltech (*Kepler*)

AMBIENTE

Le rondini di Fukushima

Sappiamo poco riguardo agli effetti delle basse dosi di radiazioni su organismi ed ecosistemi. Quattro anni dopo Fukushima, però, gli scienziati cominciano a ottenere qualche risposta

di Steven Featherstone

Steven Featherstone (*tutte le foto*)

Le rondini comuni della zona attorno alla centrale nucleare di Fukushima Daiichi sono un buon soggetto per lo studio degli effetti sugli esseri viventi della contaminazione radioattiva.

Una zona commerciale deserta della cittadina evacuata di Okuma (*pagina a fronte*).

Steven Featherstone
è scrittore e fotografo

Fino al 26 aprile 1986, quando uno dei reattori dell'impianto nucleare di Chernobyl esplose diffondendo l'equivalente del *fallout* di 400 bombe di Hiroshima sull'intero emisfero settentrionale, gli scienziati non sapevano quasi nulla sugli effetti delle radiazioni sulla vegetazione e sugli animali selvatici. La catastrofe creò un laboratorio vivente, soprattutto nei quasi 3000 chilometri quadri attorno al sito, conosciuto come zona di esclusione circostante il sito.

Nel 1994 Ronald Chesser e Robert Baker, entrambi professori di biologia alla Texas Tech University, furono fra i primi scienziati statunitensi ad avere pieno accesso alla zona. «Era un posto da urlo, molto radioattivo», ricorda Baker. «Catturammo arvicole, sembravano sane come pesci e la cosa iniziò ad affascinarci». Sequenziato il DNA delle arvicole, i due scienziati non trovarono tassi di mutazione anomali. Chesser e Baker osservarono anche lupi, linci e altre specie in precedenza rare aggirarsi nella zona come fosse una sorta di rifugio atomico per animali selvatici. In occasione del ventesimo anniversario del disastro, il Chernobyl Forum, fondato nel 2003 da un gruppo di agenzie delle Nazioni Unite, ha pubblicato un rapporto che ha confermato queste vedute, affermando che «le condizioni ambientali hanno avuto un impatto positivo sul biota» della zona, trasformandola in un «eccezionale rifugio di biodiversità».

Cinque anni dopo la perlustrazione della zona effettuata da Baker e Chesser in cerca di arvicole, Timothy A. Mousseau visitò Chernobyl per fare una conta di uccelli e trovò prove opposte. Mousseau, docente di biologia all'Università della South Carolina, e il suo collaboratore Anders Pape Møller, oggi direttore di ricerca del Laboratoire d'Ecologie, Systématique et Evolution dell'Université Paris-Sud, si occuparono in particolare di *Hirundo rustica*, la rondine comune. Nella zona trovarono assai meno rondini, e quelle rimaste avevano una minore durata della vita, minore fertilità (i maschi), diminuzione delle dimensioni cerebrali, tumori, albinismo parziale – una mutazione genetica – e un'incidenza di cataratta più alta. In più di 60 lavori pubblicati negli ultimi 13 anni, Mousseau e Møller hanno mostrato che l'esposizione a bassi livelli di radiazione ha avuto un impatto negativo sull'intera biosfera della zona, dai microbi ai mammiferi, dagli insetti agli uccelli.

Non sono mancati i critici, incluso Baker, il quale, in un articolo pubblicato nel 2006 da «American Scientist» (*Crescere con Chernobyl*, tradotto su «Le Scienze» n. 465, maggio 2007) e scritto in collaborazione con Chesser, ha sostenuto che la zona «era in pratica diventata una riserva» e che le «incredibili conclusioni» di Mousseau e Møller erano «sostenute solo da indizi». Ma le loro ricerche e l'esito del dibattito sui bassi livelli di radiazioni potrebbero essere utili per tutte le problematiche relative al nucleare, dalla risposta ai disastri alle politiche energetiche generali.

Quasi tutto quello che sappiamo sugli effetti sanitari delle radiazioni ionizzanti viene da uno studio ancora in corso sui sopravvissuti della bomba atomica chiamato Life Span Study (LSS). Gli standard di sicurezza per l'esposizione alle radiazioni sono basati sul LSS. Lo studio lascia però aperti grossi interrogativi riguardo agli effetti dell'esposizione a basse dosi di radiazioni, proprio le condizioni che ci sono a Chernobyl. La maggior parte degli scienziati concorda sul fatto che non c'è dose di radiazioni che sia certamente innocua, per quanto bassa. E le basse dosi sono le meno comprese. Lo studio LSS non ci dice molto su dosi inferiori ai 100 millisievert (mSv), e non ci dice nulla sugli ecosistemi radioattivi. Per esempio, quante radiazioni ci vogliono per provocare mutazioni genetiche, e queste mutazioni sono ereditabili? Quali sono i meccanismi e i biomarcatori genetici delle malattie indotte da radiazioni come il cancro?

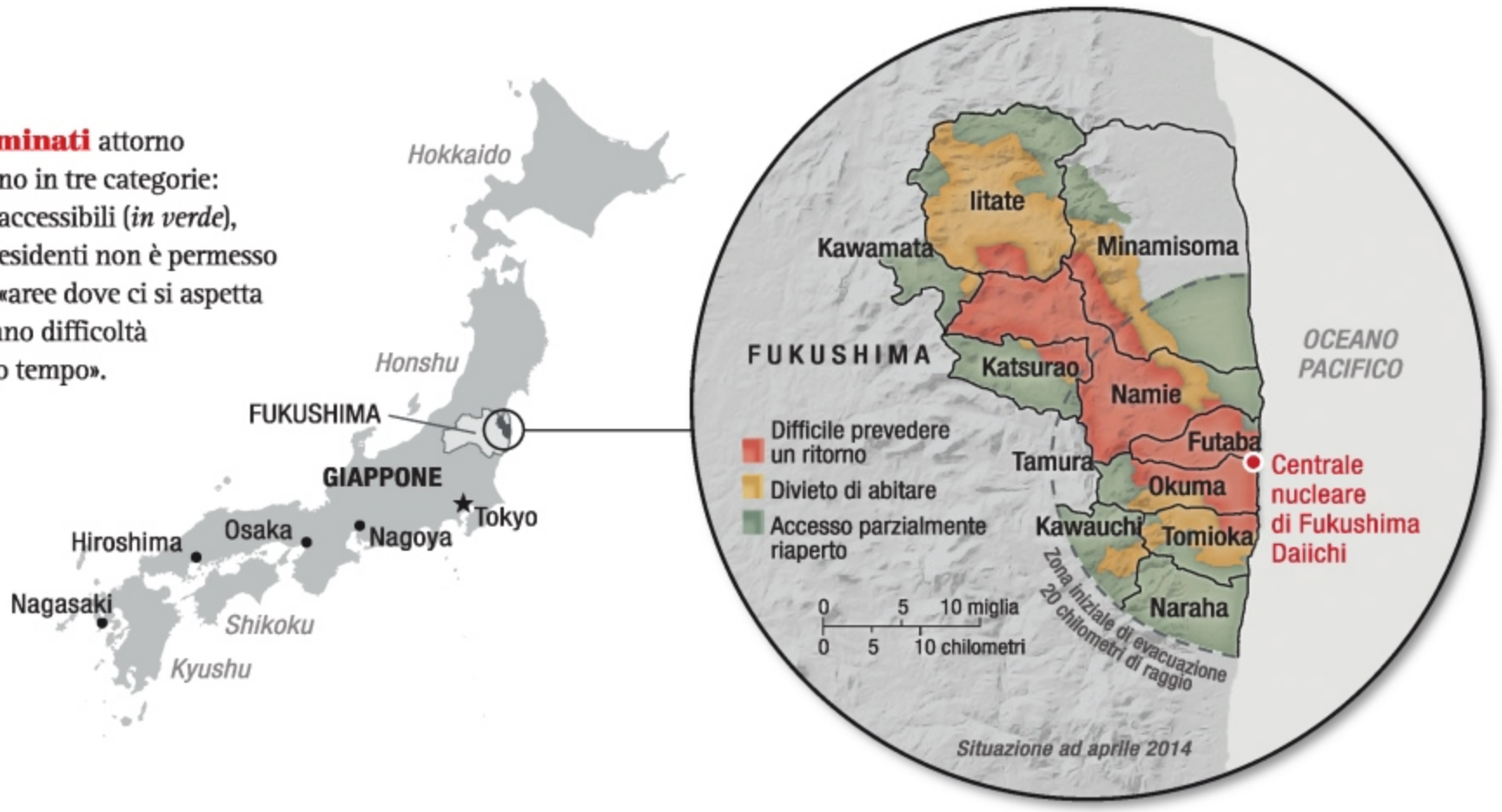
La tripla fusione del nocciolo della centrale nucleare di Fukushima Daiichi nel marzo 2011 ha offerto a Mousseau e Møller un nuovo laboratorio naturale dove studiare le basse dosi di radiazioni, replicando le ricerche fatte a Chernobyl e permettendo loro di affermare «con assai maggior confidenza che gli impatti che osserviamo sono legati alle radiazioni e non a qualche altro fattore», dice Mousseau. La zona di esclusione di Fukushima, circa 800 chilometri quadrati, è più piccola di quella di Chernobyl ma identica per altri aspetti. Entrambe includono terreni agricoli abbandonati, boschi e aree urbane dove i livelli di radioattività va-

IN BREVE

Nei quasi trent'anni trascorsi dal disastro di Chernobyl, è emerso un consenso sul fatto che flora e fauna della regione contaminata ne sono uscite sorprendentemente bene malgrado l'esposizione a lungo termine alla radiazione di fondo.

Questo consenso però è basato su dati molto limitati. La nostra conoscenza degli effetti delle basse dosi di radiazioni sugli esseri viventi resta incompleta.

La fusione del nocciolo avvenuta quattro anni fa nel reattore giapponese di Fukushima Daiichi ha dato una nuova possibilità di studiarli. I primi risultati suggeriscono che il fallout di Fukushima abbia danneggiato il biota in modi che stiamo appena cominciando a vedere.



I territori contaminati attorno a Fukushima ricadono in tre categorie: zone relativamente accessibili (*in verde*), zone in cui agli ex residenti non è permesso abitare (*in giallo*), e «aree dove ci si aspetta che i residenti avranno difficoltà a ritornare per lungo tempo».

XNR Productions (*mappa*); fonte: SAFECAST (*situazione ad aprile 2014*)

riano di ordini di grandezza su brevi distanze. E quasi certamente Mousseau e Møller avrebbero avuto accesso a Fukushima più velocemente di quello che avrebbero potuto ottenere per Chernobyl nell'era sovietica. In breve, Fukushima offriva la possibilità di risolvere la discussione.

Qualche mese dopo l'incidente, Mousseau e Møller già contavano gli uccelli di foreste montane contaminate a ovest dell'impianto ancora fumante, ma senza poter entrare nella zona stessa per osservare che cosa stava accadendo alle rondini. Finalmente nel giugno 2013 Mousseau e colleghi sono stati fra i primi scienziati ad avere pieno accesso alla zona di esclusione di Fukushima.

Una possibilità rara

La sensibilità alle radiazione varia enormemente fra gli esseri viventi e tra individui della stessa specie, e questo è uno dei motivi per cui è importante non estrapolare dalle farfalle alle rondini o da arvicole agli esseri umani. Le farfalle, dice Mousseau, sono particolarmente radiosensibili. Ad agosto 2012 la rivista scientifica *on line* «Scientific Reports» ha pubblicato un lavoro sugli effetti del fallout di Fukushima sulla farfalla *Zizeeria maha*. Joji Otaki, professore di biologia all'Università delle Ryukyu a Okinawa, ha rivelato che le farfalle di questa specie catturate vicino a Fukushima due mesi dopo il disastro avevano malformazioni ad ali, zampe e occhi. Le indagini di Mousseau e Møller sugli insetti di Chernobyl e di Fukushima registrano il declino delle farfalle come gruppo. Ma il lavoro di Otaki aggiunge una piega nuova e importante: incrociando le farfalle mutanti di Fukushima con esemplari sani di laboratorio, il tasso di anomalie genetiche è aumentato a ogni successiva generazione. Otaki è il primo scienziato a dimostrare rigorosamente l'accumularsi delle mutazioni genetiche, per diverse generazioni, in un organismo che vive a Fukushima.

Mousseau ritiene che questo fenomeno, l'accumulo di mutazioni genetiche, sia una tendenza nascosta che mina la salute degli ecosistemi radioattivi, rivelandosi occasionalmente nella prole delle farfalle mutanti o rondini con albinismo parziale. Addirittura Baker concorda con Mousseau sulle conclusioni di Otaki: «Chiaramente, alle farfalle sta accadendo qualcosa di indotto dalle radiazioni. L'esposizione multigenerazionale ha effettivamente come risultato alterazioni del genoma».

Prima di prenotare il volo per Tokyo, Mousseau aveva cercato in Giappone un fornitore di mattoncini di piombo necessari per una nuova serie di esperimenti. Non era però riuscito a trovarne abbastanza, così era arrivato a Tokyo con oltre 270 chilogrammi di mattoni di piombo, stipati in otto valigie. Ho incontrato Mousseau e il suo *postdoctoral fellow*, l'italiano Andrea Bonisoli Alquati, all'aeroporto e li ho aiutati a caricare i mattoncini nel portabagagli di un'auto noleggiata. Poi ci siamo diretti al nostro albergo a Minamisoma, a nord della centrale di Fukushima.

Fra i tonfi delle sospensioni sulle strade dissestate dal terremoto, abbiamo attraversato una serie di paesi spopolati lungo la strada tortuosa che conduceva a nord, verso la centrale. Durante la guida, Mousseau scorreva con lo sguardo negozi sbarrati e case deserte in cerca di nidi di rondine. Le rondini sono un soggetto ideale per questi studi perché sono filopatriche, cioè tendono a tornare per tutta la vita a riprodursi nello stesso luogo. Già sappiamo molto di loro in condizioni normali, e questi animali condividono caratteristiche genetiche, di sviluppo e fisiologiche simili con altri vertebrati a sangue caldo. Sono un po' come il classico canarino nella miniera di carbone, solo che qui la miniera è radioattiva. Mousseau ha contato forse una dozzina di «cicatrici», cioè resti di nidi abbandonati, macchie di fango a forma di mezzaluna sotto le gronde, ma nessun nido nuovo.

«Mostrano forti effetti negativi il primo anno», ha detto. «Me lo aspettavo che quest'anno sarebbe stato difficile trovarne».

Qualche chilometro a ovest della centrale, siamo arrivati al confine con la zona di esclusione: c'era un blocco stradale e agenti di polizia che, stupiti, hanno agitato le braccia e hanno gridato «Tornate indietro!», attraverso le maschere. I permessi di Mousseau non erano ancora validi, quindi siamo tornati indietro.

«Ma proprio non riesco a credere che non ci sia neanche un nido attivo», ha aggiunto tornando dalla deviazione da cui eravamo partiti. Ha dato un rapido sguardo a un passero fermo su un filo del telefono: «Non vedo né farfalle né libellule in volo. È proprio una zona morta».

Fukushima ci offre la rara possibilità di dare uno sguardo alle prime risposte di un ecosistema alla contaminazione radioattiva. Sappiamo poco di generazioni di arvicole e di rondini di Chernobyl, per non parlare degli altri animali. Resoconti aneddotici parlano di morti massicce di animali e piante, ma non ci sono dettagli sulla loro ripresa. Forse qualche specie ha evoluto una maggiore capacità di riparazione del DNA danneggiato dalle radiazioni? Studiare l'ecosistema di Fukushima, subito, è essenziale per

sviluppare modelli predittivi che potrebbero spiegare come procede nel tempo l'adattamento ai bassi livelli di esposizione e l'accumulo del danno genetico.

Mousseau si è rammaricato di non aver avuto accesso alla zona subito dopo l'incidente. «Avremmo dati molto più rigorosi su quante rondini c'erano e quante sono scomparse», ha detto una volta arrivati in albergo. «Quelle che stanno tornando sono i genotipi resistenti o hanno solo avuto fortuna in qualche modo?».

Una questione di dose

Il giorno dopo, convalidati i permessi, una fila di agenti ha salutato la nostra auto che superava il posto di blocco ed entrava nella zona di esclusione. Mousseau si è subito diretto ai cancelli della centrale di Fukushima. Il programma era seguire la pianura costiera, dal luogo dell'incidente – *ground zero* – ai villaggi abbandonati di Futaba, Okuma e Namie, contando una per una tutte le rondini, rilevando la posizione di tutti i nidi e catturando il maggior numero possibile di uccelli. «Ogni dato rilevato qui è di valore inestimabile», ha detto a Bonisoli Alquati.

A un miglio di distanza dalla centrale, Bonisoli Alquati ha avvistato una rondine appollaiata su un filo vicino a una casa. C'era un nido di fango fresco su una sporgenza dentro un garage. Il livello delle radiazioni toccava i 330 microsievert all'ora, pari a oltre 3000 volte il normale livello di fondo: il valore più alto rilevato da Mousseau sul campo.

«In dieci ore ti prendi la dose annua» di radiazione di fondo, ha detto Bonisoli Alquati, riferendosi alla quantità di radiazione di fondo che in media un abitante degli Stati Uniti riceve in un anno. Insieme a Wataru Kitamura, della Tokyo City University, ha appeso reti per uccelli, simili a reti da pallavolo giganti a maglie di nylon, sopra l'entrata del garage. Poi hanno aspettato per un bel po' il passaggio di una rondine. Ma Mousseau non voleva perdere tanto tempo per un solo uccello, anche se vicino a un «punto caldo». Quindi hanno piegato le reti e siamo andati verso Futaba.

Futaba è un villaggio fantasma, interdetto a tutti tranne che agli ex residenti, ai quali è consentito tornare per qualche ora ogni mese per controllare case e negozi. Un cartello nel centro commerciale del paese diceva: «Energia nucleare: il luminoso futuro dell'energia». Sulla strada principale, i livelli di radiazioni non erano peggiori di quelli di molte aree contaminate esterne alla zona. Ma la contaminazione è solo uno dei problemi di Futaba. Il terremoto di magnitudo 9.0 ha lasciato intatte poche strutture. Molti edifici si sono inclinati sulle fondamenta, alcuni sono crollati. Abbiamo seguito la strada schiacciando tegole di ceramica e vetri infranti. Ratti e corvi curiosavano in mucchi di rifiuti e cibo marcio sugli scaffali dei negozi. A un certo punto Kitamura, con il binocolo, ha contato sei rondini che volavano in cerchio vicino a un negozio devastato di articoli sportivi.

«Preparate i pali e le reti!», ha gridato.

Kitamura e Bonisoli Alquati si sono accovacciati fuori dal negozio, tenendo le reti fra le mani. Le rondini scendevano in picchiata e cantavano nel cielo, quando di colpo una coppia è entrata nel negozio. I ricercatori sono saltati in piedi e hanno teso una rete all'entrata, intrappolando gli uccelli all'interno. Ci sono volute due ore per catturare e campionare tutte e sei le rondini, una alla volta. Prima di liberarle, Mousseau ha applicato a ciascuna rondine un piccolo dosimetro a termoluminescenza, per tracciare la dose di radiazione assorbita. In seguito, alla stazione ferroviaria di Futaba, dove i livelli di radiazioni sono dieci volte più elevati, i ricercatori hanno catturato altre due rondini.

Quella sera, cena di gruppo a Minamisoma. Tutti erano stanchi morti. Ho chiesto a Kitamura che effetto gli avesse fatto osservare la zona. «Ho provato una specie di tristezza – mi ha detto – perché dopo l'incidente non è successo nulla». Turbato da quello che aveva visto a Futaba, Kitamura non aveva alcuna voglia di tornarci.

Inizialmente il governo giapponese si era impegnato a bonificare 11 delle municipalità più gravemente contaminate della Prefettura di Fukushima entro il marzo 2014. L'obiettivo era ridurre la dose annua a 1 mSv, il valore limite per la popolazione previsto dalle raccomandazioni dell'International Commission on Radiological Protection. Ma fino a oggi la massima parte degli sforzi di bonifica si è concentrata sulla stabilizzazione dei reattori nel-

2

3

4

Ufficiali di polizia esaminano permessi e passaporti all'entrata della zona ad accesso ristretto di Fukushima (*1*). Biciclette abbandonate a Futaba (*2*). Due donne a Futaba attendono che loro parenti finiscano di ispezionare quel che resta della loro pescheria (*3*). Un locale devastato dallo tsunami nella zona ad accesso ristretto (*4*).

la centrale nucleare, che continuano a liberare radiazioni nell'Oceano Pacifico. Inoltre le autorità giapponesi non hanno più una tempistica precisa riguardo alla decontaminazione, hanno invece stabilito 1 mSv all'anno come obiettivo a lungo termine e incoraggiano alcuni degli 83.000 evacuati a tornare in posti in cui la dose annua arriva fino 20 mSv, equivalente alla dose limite stabilita sempre dall'International Commission on Radiological Protection per le persone che lavorano nel settore nucleare. Di recente il partito al governo in Giappone ha pubblicato un rapporto che riconosce che molte aree contaminate non saranno abitabili per almeno una generazione.

Questo spostamento degli obiettivi evidenzia la distanza tra le nostre conoscenze degli effetti di basse dosi di radiazioni e le scelte politiche che governano, fra l'altro, i protocolli di bonifica. Anche se gli scienziati non hanno determinato una dose di radiazioni «sicura», le autorità giapponesi hanno bisogno di un numero da porsi come obiettivo per stabilire le linee da seguire per decontaminazione e reinsediamento delle popolazioni, e quindi si affidano a organismi consultivi come l'International Commission on Radiological Protection e a studi imperfetti come il LSS.

«In ultima analisi, bisogna stabilire limiti arbitrari», dice David Brenner, direttore del Center for Radiological Research della Columbia University. «Arbitrari perché non sappiamo quali sono i rischi. Ancora più arbitrari perché probabilmente non è una questione di sì o no, pericoloso o sicuro». Le ricerche di Brenner mostrano prove di un aumento nel tasso di tumori associato a dosi annue di soli 5 mSv. Sotto questa soglia arbitraria non ci sono solide prove, né a favore né contro, di rischi diretti per la salute umana, anche se Mousseau e Møller hanno osservato effetti negativi su popolazioni di piante e animali. Dei residenti di Fukushima esposti alle radiazioni nei quattro mesi dopo il disastro, il 97 per cento ha ricevuto una dose inferiore a 5 mSv. «Quando si scende a questi livelli di dose, bisogna affidarsi a quello che sappiamo dei meccanismi – argomenta Brenner – ed è molto limitato».

Precisione necessaria

In un sobborgo residenziale alla periferia di Namie, Bonisoli Alquati ha scovato un nido di rondine nel vicolo stretto che separa due case. È il primo nido attivo di una giornata deludente, passata a percorrere il distretto deserto attorno a Futaba e Namie, contando solo nidi vuoti e «cicatrici». Contare i nidi, prima che siano tutti sciolti dalle piogge, è essenziale per stabilire un riferimento di base sulla popolazione delle rondini prima dell'incidente, ma per il lavoro di laboratorio Mousseau ha bisogno anche di campioni da uccelli vivi. Il nido del vicolo conteneva tre pulcini, i primi da lui trovati nella zona, e tre uova. «Questo nido è importante», ha detto Mousseau. Una voce registrata gracchiava dal sistema pubblico di altoparlanti e riecheggiava irreale tra la foschia dei colli e le risaie incolte: entro un'ora la zona avrebbe chiuso.

Sul sedile anteriore dell'auto, Bonisoli Alquati ha tirato fuori un pulcino da un contenitore di plastica e ha effettuato una serie di misurazioni con vari strumenti. Soffiando sulle piume lanuginose sotto l'ala, ha scoperto una zona della pelle del pulcino e l'ha

punta con un ago. Un po' di sangue è andato in un piccolo tubo; un altro po' su un vetrino. Poi ha infilato l'uccellino in un sacchetto di tela e lo ha sistemato nel «forno», una «pila» di mattoncini di piombo tenuti insieme con il nastro adesivo. I mattoncini formavano una camera schermata in cui Mousseau poteva misurare il carico radioattivo totale dei singoli animali senza che le radiazioni di fondo confondano il risultato.

«L'obiettivo è riuscire a osservare i singoli uccelli da un anno all'altro e determinare se la loro probabilità di sopravvivenza è collegata alla dose che hanno ricevuto», ha spiegato. «Se vogliamo arrivare al meccanismo della variazione genetica e della radiosensibilità, e al loro impatto sui singoli animali, allora questa dosimetria più precisa è necessaria».

Ma nel punto in cui ci trovavamo il livello delle radiazioni era troppo elevato per permettere misurazioni accurate. Mousseau ha quindi spostato l'auto più avanti sulla stessa strada e ha azzerato nuovamente lo spettrometro gamma. Dopo qualche minuto lo strumento ha mostrato il segnale specifico della contaminazione da cesio-137, il principale isotopo del fallout di Fukushima. Il pulcino, che forse era nato da appena una settimana, era radioattivo.

Un segnale troppo debole?

Ogni giorno la polizia fermava l'auto di Mousseau per esaminare attentamente i permessi. L'unica parola che capivo, in questi tesi scambi verbali, era *tsubame*, che in giapponese significa «rondine». Ogni volta che veniva pronunciata, la parola suscitava sorrisi perplessi. In Giappone le rondini sono di buon auspicio, molti inchiodano piccole piattaforme di legno al portone di casa per attirarle. Come le case, nella zona le piattaforme erano tutte vuote.

Ogni giorno, dopo l'ora di chiusura della zona, Mousseau e Bonisoli Alquati lavoravano fino a notte inoltrata per catturare altre rondini nelle zone non contaminate a nord di Fukushima. Non contaminate in senso relativo. A Minamisoma, evacuata durante il disastro, la radiazione di fondo è ancora il doppio del normale. Eppure, trascorsa l'intera giornata nella zona, gli ordinati quartieri di Minamisoma, identici a quelli di Namie, Futaba e Okuma, sembravano un universo parallelo. Era strano trovare nidi di rondine pieni di grassi pulcini canterini. I vicini, incuriositi uscivano spesso di casa a guardare Mousseau e Bonisoli Alquati catturare gli uccelli. Ogni volta ci offrivano tè e dolci e domandavano in modo cortese delle radiazioni.

«L'anno scorso una delle cose che più colpivano erano le persone che chiedevano: "Ma è sicuro o no? Facciamo bene a vivere qui?"», ricordava Bonisoli Alquati. «Questo devono dirlo i politici. Io rispondo che noi siamo qui per gli uccelli».

Durante il suo ultimo giorno in Giappone, Mousseau ha notato un nido attivo appeso a un lampione del portico di una casa vuota in un vicolo di Kashima e ha chiesto a un vicino il permesso di catturare gli uccelli. L'uomo era un membro della locale azienda fluviale e diceva di essere contento che qualcuno studiasse la contaminazione radioattiva, visto che il governo non lo faceva. «Il governo, sempre segreti», ha aggiunto, lamentandosi del fallout che finisce nel fiume. Nei pesci *koi* pescati nel fiume si sono registrati 240.000 becquerel di cesio per chilogrammo, ha detto l'uomo. Per fortuna non si mangiano, visto che in Giappone il limite per il consumo umano è di 100 becquerel per chilogrammo.

Un altro residente del quartiere ha chiesto a Mousseau di misurare con il dosimetro le radiazioni lungo la strada. Mousseau l'ha accontentato, scribacchiando i numeri – tutti ben superiori ai normali livelli di fondo – su un pezzetto di carta, che l'uomo dell'azienda fluviale ha preso con un solenne cenno del capo. Mentre rimettevamo a posto le reti, preparandoci ad andare via, un'anziana signora ha tirato fuori un pacchetto di mandarini, dicendo qualcosa che si poteva tradurre come «si possono mangiare».

«Mi dispiace», ho detto. «Non posso aiutarla».

Ma la donna è tornata a offrire i mandarini, e ho capito che non stava facendo una domanda: voleva rassicurarmi che quello che mi offriva non era stato contaminato da Fukushima.

«Questi vanno bene», ha detto, sorridendo. «Da Nagasaki».

Un giorno al 40 per cento di noi sarà diagnosticata qualche forma di cancro. Se si nasconde un segnale nel rumore di questa statistica, che certo fa riflettere, un segnale che potrebbe puntare a tumori indotti di bassi livelli di radiazione, allora è troppo debole per poter essere identificato dagli epidemiologi. Le grandi do-

Il biologo Andrea Bonisoli Alquati raccoglie un campione di escrementi di rondine dal pavimento di un garage a Futaba (*1*). Bonisoli Alquati preleva da una rondine un campione di sangue per cercare prove di danno genetico e stress ossidativo (*2*). Timothy A. Mousseau con una rondine catturata a Okuma (*3*). Mousseau libera una rondine a Futaba (*4*).

mande sulle basse dosi troveranno risposta nello studio «dei danni ai cromosomi indotti da radiazioni, o dell'espressione genetica indotta da radiazioni, o dell'instabilità genomica», dice Brenner. Questa è la direzione che Mousseau e Møller stanno iniziando a seguire con le loro ricerche sulle rondini.

«I tumori, purtroppo, non ci dicono se a causarli sono state le radiazioni o qualche altra cosa», dice Mousseau. Se avesse abbastanza fondi, Mousseau sequenzierebbe il DNA di ognuna delle rondini a cui ha applicato i dosimetri. Confrontando i risultati con le singole dosi stimate, potrebbe forse riuscire a scoprire biomarcatori genetici per le malattie indotte da radiazioni.

Guardare il genoma

Lo scorso novembre Mousseau è tornato a Fukushima per la dodicesima volta: 18 mesi dopo che ero entrato con lui nella zona. Con Møller, ha pubblicato tre ricerche che hanno dimostrato il ripido declino delle popolazioni di uccelli a Fukushima. Mousseau dice che i dati dell'ultimo censimento, che si preparano a pubblicare sul «Journal of Ornithology», forniscono prove clamorose della continuazione del declino, «senza alcuna prova di effetto soglia». Per qualche ragione, però, sembra che la radiazione stia uccidendo gli uccelli di Fukushima a un tasso doppio rispetto a quello di Chernobyl. «Forse c'è una mancanza di resistenza, o forse una maggiore radiosensibilità nella popolazione autoctona di Fukushima», dice Mousseau. «Forse negli uccelli di Chernobyl si è evoluto un certo grado di resistenza, o quelli più sensibili sono già stati eliminati negli ultimi 26 anni. Non sappiamo quale sia la risposta, ma speriamo di arrivarci». La risposta potrebbe venire dal sangue delle rondini prelevato da Mousseau e Bonisoli Alquati nella nostra spedizione. Un'analisi preliminare di quei campioni non ha mostrato alcuna prova di un aumento significativo del danno genetico, sebbene sia ancora presto per dirlo. C'è bisogno di un numero molto più grande di campioni prelevati da rondini delle aree più contaminate, dove la popolazione sta crollando.

Anche se i primi risultati di Mousseau e Møller danno indicazioni convincenti di un ecosistema in difficoltà a Fukushima, nel rapporto 2014 lo United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) riecheggia le sue precedenti valutazioni su Chernobyl, dichiarando che gli effetti delle radiazioni sul «biota non umano» nelle aree altamente contaminate «non sono chiari», e in quelle meno contaminate sono «insignificanti».

«La nostra è ricerca di base, non tossicologia, ma l'UNSCEAR non si è neanche preso il disturbo di chiederci del nostro lavoro o trovare qualcuno che ne interpretasse i risultati», dice Mousseau. «Sono quelli che stabiliscono i limiti standard per la salute umana, e stanno ignorando un bel po' di informazioni potenzialmente rilevanti».

E aggiunge che le prove ignorate sono sostanziali. «Negli anni della mia esperienza a Chernobyl e ora a Fukushima, abbiamo trovato segnali di effetti di un aumento dei tassi di mutazione in quasi ogni specie e ogni rete di interazioni ecologiche che siamo andati a guardare», dice Mousseau. «È tutto lì: aspetta solo di essere osservato, descritto e pubblicato».

Baker non ha in programma di effettuare ricerche a Fukushima, ma di recente ha sequenziato il DNA di un diverso genere di arvicole di Chernobyl. I nuovi dati sembrano sostenere le conclusioni di Mousseau e Otaki secondo cui all'esposizione alle radiazioni è associato un aumento dei tassi di mutazione. Le conseguenze dell'esposizione multigenerazionale – se diminuisca o meno la *fitness* o le capacità riproduttive degli animali, o se causi difetti congeniti o tumori nelle generazioni successive – non sono ancora chiare. «Dobbiamo continuare a fare ricerca genomica – dice Baker – è lì che sta la vera storia». ■

PER APPROFONDIRE

L'ombra di Fukushima. Bonisoli Alquati A., in «Le Scienze» n. 547, marzo 2014.

Articolo e fotogalleria di Andrea Bonisoli Alquati sulle conseguenze ambientali dell'incidente di Chernobyl, sito web di «Le Scienze»: **http://www.lescienze.it/news/2014/04/25/foto/chernobyl_incidente_conseguenze_ambientali-2111876/1/#1.**

Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. National Research Council, National Academies Press, 2006.

Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience: Report of the Chernobyl Forum Expert Group «Environment». International Atomic Energy Agency, 2006.

Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment. Yablokov A.V. e altri, in «Annals of the New York Academy of Sciences», Vol. 1181, dicembre 2009.

Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. *UNSCEAR 2013 Report*, Vol. 1, Nazioni Unite, aprile 2014.

Chronic Exposure to Low-Dose Radiation at Chernobyl Favours Adaptation to Oxidative Stress in Birds. Galván I. e altri, in «Functional Ecology», Vol. 28, n. 6, pp. 1387-1403, dicembre 2014.

Una notte stellata. La Via Lattea splende nel cielo sopra l'Oceano Pacifico, al largo della costa del deserto di Atacama, in Cile.

ASTRONOMIA

A caccia di

Per chiarire il meccanismo della formazione galattica, gli astronomi vanno alla ricerca di resti di piccole galassie che in epoche remote furono distrutte e inghiottite dalla nostra galassia

FOSSILI

NELLA VIA LATTEA

di Kathryn V. Johnston

Kathryn V. Johnston è professore e preside presso il Dipartimento di astronomia della Columbia University. Nata nello Yorkshire, nel Regno Unito, ha compiuto gli studi all'Università di Cambridge e all'Università della California a Santa Cruz. Il suo principale interesse di ricerca riguarda la formazione e la crescita delle galassie, in particolare della Via Lattea.

Uscite in una notte buia e limpida, lontano dal bagliore delle luci cittadine, e alzate lo sguardo. Vedrete la fascia luminosa della Via Lattea che attraversa il cielo formando un arco imponente. Sono trascorsi quattro secoli da quando Galileo Galilei per primo puntò il telescopio verso di essa e osservò che il «latte» è costituito in realtà da innumerevoli stelle, troppo deboli per essere distinte a occhio nudo. Dovettero passare altri tre secoli prima che gli astronomi si convincessero che la Via Lattea non è che una dei miliardi di galassie nell'universo.

Di fatto, la Via Lattea non è semplicemente una singola galassia: ricerche recenti hanno dimostrato che nel tempo ha attratto e inghiottito molte galassie più piccole, inglobando le stelle che le costituivano. Si conoscono almeno 20 galassie nane – di grandezza variabile da un milionesimo a un centesimo di quella della Via Lattea – che attualmente orbitano attorno alla nostra galassia, e probabilmente ne restano ancora decine da scoprire. Si ritiene però che le attuali galassie satelliti non siano che una minuscola frazione di quelle esistenti in passato: le altre sono state da lungo tempo attratte dalla gravità della nostra galassia e assorbite. Questo processo iniziò quando la Via Lattea era più giovane e più piccola rispetto a oggi e prosegue ancora oggi: è presumibile che le attuali galassie satelliti finiranno prima o poi per essere divorate.

Ma, nonostante sia passato molto tempo dalla loro fine, queste vittime dell'appetito gravitazionale della Via Lattea hanno lasciato tracce ancora visibili sotto forma di deboli correnti di stelle che attraversano il cielo. Negli ultimi 15 anni un filone di ricerca chiamato archeologia galattica ha individuato molte di queste correnti. Attraverso lo studio di questi fossili del passato della nostra galassia, gli archeologi galattici ricompongono i dettagli della storia della Via Lattea e, più in generale, raccogliendo informazioni preziose su come si formano ed evolvono tutte le galassie a spirale.

Una galassia andrebbe studiata sia dall'interno sia dall'esterno. Questo è impossibile nel caso della Via Lattea. Ma, approfittando della nostra posizione che consente una visione ravvicinata del suo interno, possiamo ottenere informazioni dettagliate che l'osservazione dall'esterno delle altre galassie non ci può fornire.

Questo nuovo settore di studio ha già contribuito a confermare uno dei meccanismi che determinano la crescita delle giovani galassie. La scoperta di numerose correnti stellari che derivano da galassie satelliti scomparse supporta l'accreditata teoria secondo cui la Via Lattea era inizialmente un oggetto di piccole dimensioni e la sua crescita è avvenuta, in parte, con l'acquisizione di massa a grandi «bocconi»: questo processo è chiamato formazione gerarchica di strutture. Sebbene molti dettagli di questo scenario restino misteriosi, stiamo lentamente, ma costantemente, ricomponendo la biografia della Via Lattea.

Come costruire una galassia

Secondo la teoria gerarchica della formazione delle galassie, il principale fattore che determina la crescita delle grandi galassie simili alla Via Lattea non è la materia barionica, cioè stelle, gas e polvere che possiamo osservare e che sono composti dalle stesse particelle da cui noi siamo composti. La forza motrice è invece rappresentata da «aloni» sferici di materia oscura invisibile che circondano le galassie. Si ritiene che gli aloni di materia oscura abbiano in un primo momento piccole dimensioni e che poi si aggreghino in aloni più grandi: potrebbe essere questo il fattore chiave che porta le grandi galassie a inglobare quelle più piccole.

Attualmente l'alone di materia oscura di tutte le galassie ha una massa e un'estensione molte volte più grandi rispetto alla materia ordinaria visibile. Strano a dirsi, sebbene la natura della materia oscura sia ancora un'incognita (la percepiamo solo attraverso i suoi effetti gravitazionali), il concetto della sua condensazione in aloni è considerato quasi un dato di fatto, poiché le osservazioni relative alla formazione di ammassi e all'interazione tra galassie concordano con le previsioni dei modelli che postulano l'aggregazione della materia oscura. In realtà il mistero della formazione delle galassie non è nella materia oscura, ma nella materia barionica ordinaria, costituita da particelle le cui interazioni sono note e possono essere studiate sulla Terra.

La teoria di base che descrive il contributo della materia barionica all'evoluzione delle galassie parte dall'alone di materia oscura. La forza di gravità di quest'ultimo attrae la materia ordinaria sotto forma di gas. Se ci sono le condizioni adatte, il gas, mentre si avvicina al centro dell'alone, può condensare in stelle. Una volta raggiunta la fine della loro esistenza, alcune stelle esplodono, restituendo i propri atomi al gas nell'interno e (forse) anche all'esterno della galassia e spesso innescando la formazione di un'altra generazione di stelle a partire dal gas e dalla polvere rimanenti. È probabile che il nucleo centrale (il «rigonfiamento») e i bracci di spirale (il «disco») della Via Lattea si siano formati in questo modo.

Ma nella Via Lattea c'è una colossale sfera (chiamata sempre alone) che circonda il rigonfiamento e il disco, ed è formata da stelle più distanziate fra di loro. Molte di queste stelle provengo-

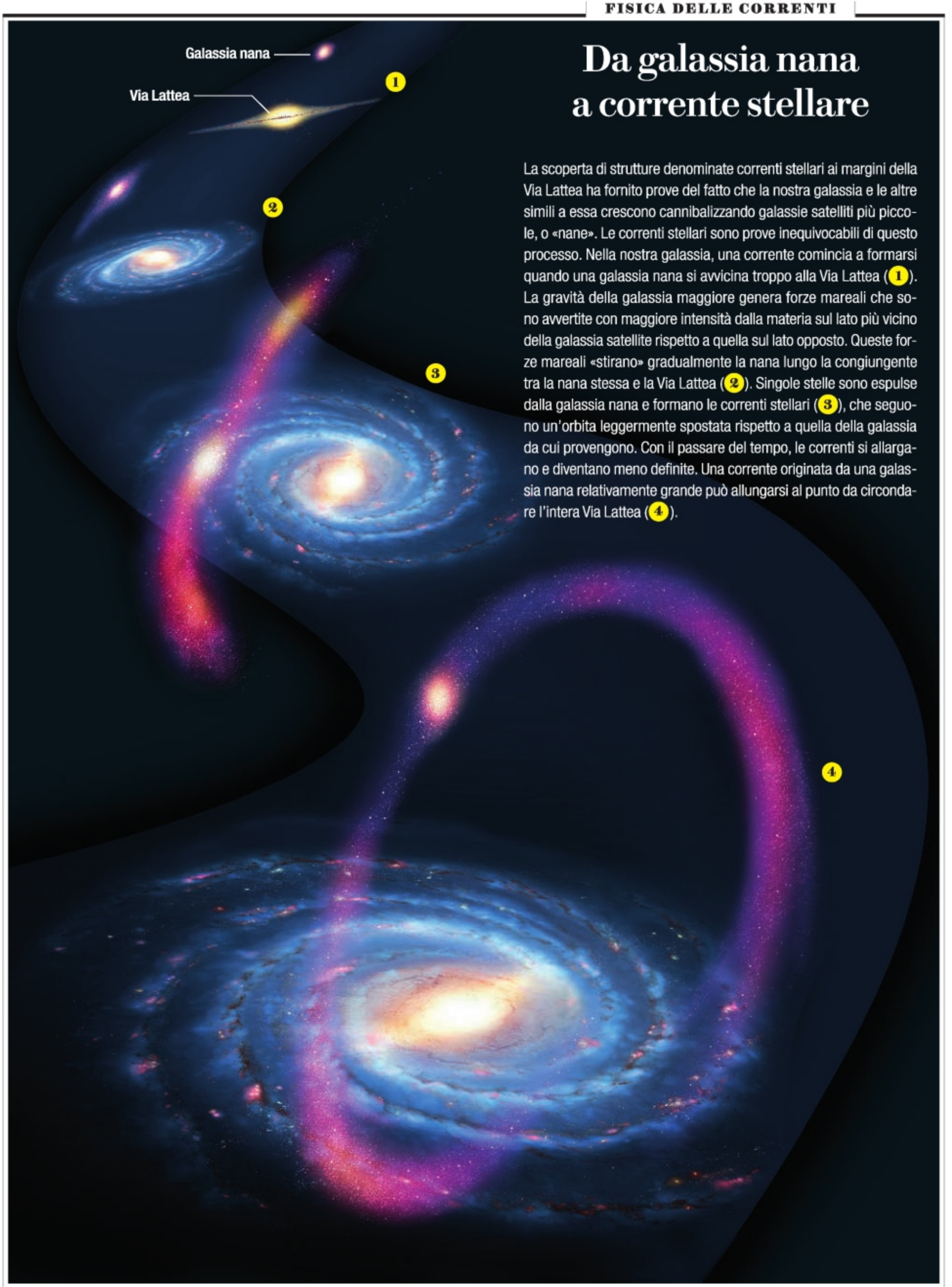
IN BREVE

La gravità della Via Lattea distrugge lentamente le galassie nane che orbitano attorno a essa, formando lunghe «code» denominate correnti stellari. Gli astronomi che si autodefiniscono archeologi galattici usano questi fossili di galassie perdute per ricostruire il passato della Via Lattea. **La prima prova** di un'immensa corrente stellare attorno alla nostra galassia fu scoperta nel 2003, e da allora ne sono state individuate altre, una decina in tutto. L'analisi di queste correnti sostiene la teoria secondo cui la Via Lattea sarebbe cresciuta in maniera discontinua, inghiottendo galassie più piccole. **In futuro,** lo studio delle caratteristiche orbitali e chimiche delle stelle permetterà di identificare quelle che un tempo appartenevano a correnti stellari ormai disperse. Un giorno l'archeologia galattica potrebbe chiarire non solo la storia della Via Lattea, ma anche l'evoluzione nel tempo delle galassie in generale.

Pagine precedenti: Babak Tafreshi/National Geographic

Da galassia nana a corrente stellare

La scoperta di strutture denominate correnti stellari ai margini della Via Lattea ha fornito prove del fatto che la nostra galassia e le altre simili a essa crescono cannibalizzando galassie satelliti più piccole, o «nane». Le correnti stellari sono prove inequivocabili di questo processo. Nella nostra galassia, una corrente comincia a formarsi quando una galassia nana si avvicina troppo alla Via Lattea (1). La gravità della galassia maggiore genera forze mareali che sono avvertite con maggiore intensità dalla materia sul lato più vicino della galassia satellite rispetto a quella sul lato opposto. Queste forze mareali «stirano» gradualmente la nana lungo la congiungente tra la nana stessa e la Via Lattea (2). Singole stelle sono espulse dalla galassia nana e formano le correnti stellari (3), che seguono un'orbita leggermente spostata rispetto a quella della galassia da cui provengono. Con il passare del tempo, le correnti si allargano e diventano meno definite. Una corrente originata da una galassia nana relativamente grande può allungarsi al punto da circondare l'intera Via Lattea (4).



Fonte: David Hendel

no probabilmente da galassie nane distrutte da tempo. Secondo la teoria della formazione gerarchica, la sequenza di eventi con cui queste stelle entrano a far parte dell'alone potrebbe essere la seguente: una galassia nana in orbita attorno alla Via Lattea è soggetta all'attrazione gravitazionale della galassia maggiore, sempre più intensa via via che il satellite si avvicina. La materia che si trova sul lato della galassia satellite più vicino alla Via Lattea (stelle, gas, polvere e materia oscura) avverte una forza di attrazione poco più grande rispetto alla materia sul lato opposto.

Di conseguenza la galassia nana si allunga nel senso della linea tra lei e la galassia maggiore. L'allungamento è provocato dalle cosiddette forze mareali, con un meccanismo analogo a quello con cui la Luna produce le maree degli oceani terrestri. Al contrario dell'interazione Terra-Luna, le forze mareali esercitate dalla Via Lattea sui suoi satelliti possono essere abbastanza intense da togliere materia: in questo caso, stelle espulse dal corpo della galassia nana. Una volta rimosse, queste stelle restano soggette alla stretta gravitazionale della Via Lattea e procedono lungo una traiettoria leggermente spostata rispetto all'orbita della galassia satellite. Con il passare del tempo il lieve spostamento fa sì che la materia espulsa da quest'ultima si diffonda costantemente e si allontani dalla galassia satellite, formando le correnti stellari.

Questa costruzione teorica appare coerente, ma per lungo tempo agli scienziati sono mancate prove osservative che la sostenessero. Oggi le cose sono cambiate. L'identificazione di molte correnti stellari ha rivelato che la Via Lattea iniziò a divorare le sue vicine già miliardi di anni fa, quando era ancora giovane, e continua ancora oggi. Sebbene sia possibile dimostrare l'esistenza di correnti stellari provenienti da compagne nane principalmente attorno alla Via Lattea, è probabile che correnti analoghe si trovino attorno a tutte le galassie a spirale dello stesso tipo, sebbene siano in genere troppo deboli per essere rilevate a distanze così grandi.

Molti dettagli del processo di formazione gerarchica, però, restano sfuggenti: per esempi in quale epoca la nostra galassia assorbì la maggior parte dei satelliti, quanto spesso divori le galassie nane e quanto tempo impieghi per inglobarne le stelle. Per rispondere, gli astronomi devono localizzare sia ulteriori correnti stellari da analizzare in dettaglio sia i resti di correnti ormai scomparse.

Caccia ai fossili di galassie

Ci sono diversi metodi per andare a caccia di correnti stellari nella Via Lattea. Il primo, il più diretto, consiste nel cercare gruppi di stelle situate alla medesima distanza che formino lunghi filamenti. A questo scopo, è necessario affidarsi a una buona mappa stellare tridimensionale che mostri distanza e posizione del maggior numero possibile di stelle in tutte le direzioni.

Negli ultimi 15 anni gli archeologi galattici hanno potuto disporre di questo strumento sotto forma dei dati della Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Con un telescopio dedicato presso l'Apache Point Observatory nel New Mexico, questo progetto ha creato una banca dati di oltre 80 milioni di stelle della Via Lattea, completo di informazioni su distanza, colore e altre caratteristiche, con una copertura superiore a un quarto del cielo. Il colossale numero di stelle in questo catalogo ha subito offerto un'opportunità straordinaria di scavare in cerca di fossili del passato della Via Lattea.

Si ritiene che la frazione di stelle nate in altre galassie e poi inglobate nella nostra sia piccola, circa l'uno per cento o meno delle centinaia di miliardi di stelle della Via Lattea. Ma la mappa della SDSS forniva quasi un milione di potenziali stelle intruse da esaminare in cerca di prove di galassie defunte. Gli archeologi galattici hanno prima analizzato la mappa per individuare stelle che potessero trovarsi alla distanza giusta per far parte all'alone galattico. Considerando questa popolazione, hanno poi localizzato le correnti stellari concentrandosi sulle regioni con una densità di stelle più elevata rispetto alle zone circostanti e di forma allungata come una coda. Un riferimento utile per distinguere queste code era costituito da simulazioni pubblicate nel 2005 da me e da James Bullock, cosmologo dell'Università della California a Irvine. In quelle simulazioni avevamo sfruttato le nostre conoscenze sulla formazione gerarchica degli aloni di materia oscura, combinate con la fisica delle forze mareali, per prevedere grandezza e dispersione delle correnti stellari formatesi quando molte galassie nane furono inghiottite durante la formazione della Via Lattea.

Le prime prove convincenti dell'esistenza di una grande corrente stellare si ebbero nel 2003, quando un gruppo di astronomi diretti da Steve Majewski, dell'Università della Virginia, individuò gigantesche code che uscivano dalla più vicina tra le galassie satelliti della Via Lattea conosciute, la nana del Sagittario, nei dati raccolti dalla Two Micron All Sky Survey (un progetto simile alla SDSS, ma condotto nell'infrarosso). Le correnti sono vicine alla traiettoria prevista per la nana del Sagittario e contengono un numero di stelle quasi uguale a quello delle stelle rimaste ancora nella nana stessa. Le code sono così lunghe da circondare la nostra galassia. La Via Lattea era dunque stata sorpresa nel corso di un attacco alla sua compagna più prossima.

Dopo quella scoperta, gli archeologi galattici hanno portato alla luce nel catalogo della SDSS una decina di altre correnti stellari che circondano la nostra galassia. In base alla lunghezza delle code della nana del Sagittario, possiamo stimare che questa galassia stia perdendo stelle da 2-3 miliardi di anni. Anche le altre correnti stellari osservate sembrano avere un'età di alcuni miliardi di anni. Queste scoperte indicano che l'assorbimento di galassie da parte della Via Lattea avveniva più frequentemente ai primordi della storia della nostra galassia ed è andato riducendosi via via che diminuiva il numero di galassie nane da divorare. Fin qui i risultati sono in linea con le previsioni della teoria della formazione gerarchica. Le correnti stellari note, però, sono probabilmente solo una frazione del totale. Dovrebbero essercene molte altre, che sono troppo deboli per essere osservate ma custodiscono indizi importanti sul passato della nostra galassia.

Nuovi strumenti per lo scavo

Il metodo che sfrutta le posizioni delle stelle per identificare le correnti stellari non può evidenziare molte delle correnti più antiche perché, nell'arco di qualche miliardo di anni, le piccole differenze fra le proprietà orbitali delle singole stelle fanno sì che le correnti si allunghino, si diffondano e si attenuino al punto da perdere qualsiasi evidente struttura. Gli astronomi stanno quindi cercando di sfruttare altre proprietà stellari per individuare correnti più disperse, e anche resti di correnti dissolte. Questi insiemi di stelle ci aiuteranno a indagare l'epoca più attiva di formazione galattica, che si colloca oltre 10 miliardi di anni fa, nei primi miliardi di anni dopo il big bang, quando si formò la maggior parte delle stelle dell'universo. È l'epoca in cui centinaia di piccole galassie e ammassi stellari vennero inglobati nella Via Lattea.

Un metodo per andare a caccia di questi resti di galassie scomparse consiste nel cercare stelle con orbite comuni. Anche molto tempo dopo che le stelle delle correnti si sono disperse al punto che è impossibile riconoscerle dalle loro posizioni, possiamo sfruttarne il moto per identificare quelle che un tempo appartenevano

alla stessa galassia satellite e stabilire come sono state inglobate nella Via Lattea. È uno degli obiettivi del satellite Gaia, dell'Agenzia spaziale europea, lanciato nel dicembre 2013. Gaia dedicherà i prossimi quattro anni alla raccolta di dati che cambieranno le carte in tavola per gli archeologi galattici, misurando distanza, posizione e moto di oltre un miliardo di stelle. Questa mole di dati sarà preziosissima per affrontare il nostro problema, sia per il numero colossale di stelle catalogate sia perché le informazioni multidimensionali ottenute per ciascuna stella ci permetteranno di calcolarne interamente l'orbita. Potremo quindi selezionare quelle stelle le cui proprietà orbitali simili suggeriscono una probabile provenienza dalla stessa antica galassia, anche se le loro attuali posizioni nel cielo non offrono più alcuna indicazione di un'originaria parentela.

Oltre a questo, le stelle ricordano sempre il loro luogo di nascita anche per un altro aspetto, la composizione chimica, che offre potenzialmente un ulteriore metodo per individuare correnti stellari. Le stelle cambiano costantemente la propria composizione globale a causa delle reazioni di fusione nucleare che avvengono al loro interno, e che consumano elementi leggeri sintetizzando elementi più pesanti. Tuttavia la fusione nucleare avviene solo nelle regioni centrali, più dense e più calde, della stella e si ritiene che l'atmosfera stellare, la regione misurata dagli astronomi, sia identica per composizione al gas da cui la stella è nata. Kenneth Freeman, dell'Australian National University, e Joss Bland-Hawthorn, dell'Università di Sydney, intendono usare questa memoria perfetta non per cercare correnti stellari, ma per collegare stelle con identiche «impronte digitali» chimiche agli ammassi stellari che furono la loro culla, senza alcun riferimento alla posizione attuale nel cielo.

Le correnti stellari note sono probabilmente solo una frazione del totale. Dovrebbero esisterne molte altre, troppo deboli per essere osservate con gli strumenti attuali.

Il semplice metodo di Freeman e Bland-Hawthorn, che usa un'unica etichetta chimica, non può essere applicato all'identificazione delle stelle associate a una galassia nana, dato che a loro volta queste galassie contengono probabilmente stelle nate in molti ammassi diversi e quindi con composizioni chimiche differenti. Tuttavia la natura della storia del cosmo e della formazione stellare fa sì che un approccio chimico appaia comunque promettente per raccogliere informazioni sulla storia dell'accrescimento della Via Lattea.

Innanzitutto, in genere le stelle che si sono formate tardivamente in una data galassia contengono una maggiore percentuale di elementi pesanti rispetto a quelle più antiche perché la materia che le costituisce era già stata arricchita dai resti delle generazioni stellari precedenti. Inoltre, l'esatto meccanismo con cui si verifica l'arricchimento è determinato da flussi di gas che sono a loro volta soggetti all'influenza gravitazionale dell'alone di materia oscura della galassia. Questi due effetti fanno supporre che da galassie con più o meno la stessa massa e che crescono e vengono distrutte più o meno contemporaneamente dovrebbero provenire stelle con la stessa distribuzione di composizioni chimiche, ovvero gli stessi intervalli di abbondanze di molti elementi diversi. Al contrario, differenze nella massa o nell'epoca di crescita di una galassia porteranno a differenze nella distribuzione chimica delle stelle provenienti da quella stessa galassia. Quindi la distribuzione di composizioni chimiche delle stelle che circondano la Via Lattea ci permetterebbe di distinguere quale frazione provenga, se non proprio dalla stessa galassia, almeno da galassie di massa simile e datazione simile.

Duane Lee ha esplorato questa idea mentre lavorava nel mio gruppo alla Columbia University. Le sue ricerche preliminari indicano che le etichette chimiche potrebbero avere una sensibilità sufficiente per consentire l'individuazione di stelle provenienti anche dalle più piccole galassie nane distrutte nelle primissime fasi della storia galattica. Conoscendo quali frazioni delle stelle della Via Lattea siano arrivate dall'esterno in epoche differenti, si può iniziare a delineare una sequenza di cannibalizzazioni e a ricostruire la storia della crescita della nostra galassia fin dalle epoche più remote. Attualmente due gruppi di ricerca misurano la composizione chimica di milioni di stelle e i loro dati potranno essere usati per affrontare questo problema. Uno è il GALactic Archaeology with HERMES (GALAH), diretto da Freeman e Bland-Hawthorn, che sta lavorando a una mappa pilota. Il secondo è l'APO Galactic Evolution Experiment (APOGEE), in corso dal 2011 nell'ambito dell'SDSS.

Solo ora gli archeologi galattici iniziano a capire che studiare la Via Lattea è come studiare 1000 galassie, perché la nostra galassia si è formata nel tempo dalla combinazione di un numero elevato di oggetti più piccoli. I fossili di queste galassie perdute ci informano non solo sulla storia della Via Lattea, ma anche su quella di tutte le galassie più piccole che la nostra galassia include. Presto potremo studiare, senza muoverci dai nostri laboratori, come si formarono galassie di tante dimensioni diverse in molte epoche differenti. Nel prossimo decennio, analisi del genere saranno potenzialmente in grado di fornire alla teoria della formazione delle galassie un contributo non inferiore a quello offerto nello scorso decennio dalla straordinaria scoperta delle correnti stellari che circondano la Via Lattea.

Il nostro obiettivo finale è stabilire come si formarono le primissime galassie del cosmo. Le più antiche progenitrici delle galassie simili alla nostra sono troppo piccole e lontane per essere rilevabili in modo diretto. L'archeologia galattica potrebbe però individuare quello che rimane di questi oggetti primordiali: stelle di lunga vita che recano l'impronta della propria origine sono sparse in tutto il disco della Via Lattea. Non è quindi un'iperbole affermare che, scavando nel nostro orticello, potremo aprire una finestra sull'universo primordiale e sulle prime fasi della formazione galattica, che sono impossibili da studiare con qualsiasi altro mezzo. ■

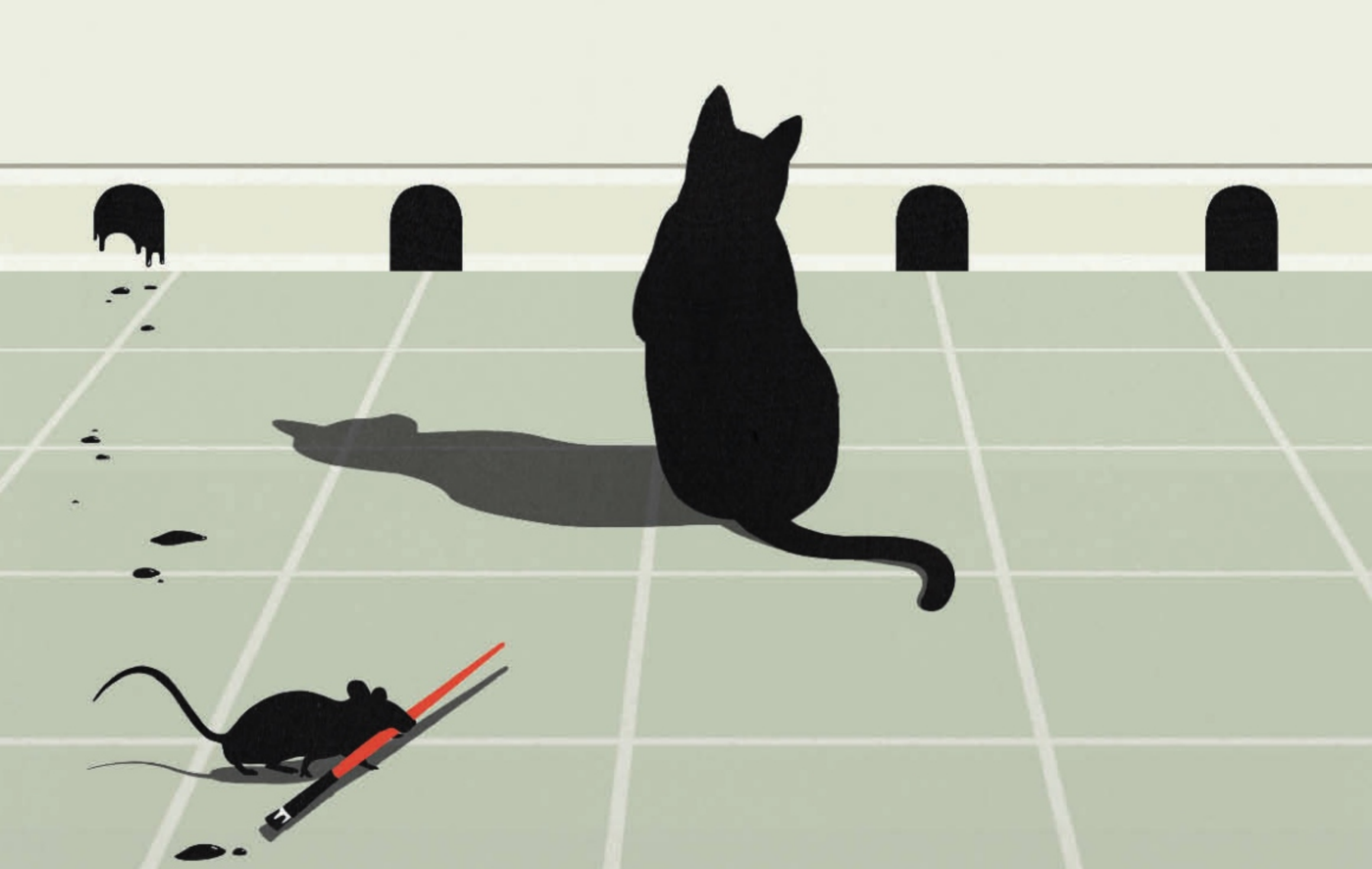
PER APPROFONDIRE

Tracing the Milky Way's History. Chiappini C., in «Sky & Telescope», Vol. 108, n. 4, pp. 32-40, ottobre 2004.

Sloan Digital Sky Survey: **www.sdss.org.**

Fantasmi di antiche galassie. Ibata R. e Gibson B., in «Le Scienze» n. 465, maggio 2007.

Le galassie nane e la rete oscura. Libeskind N. I., in «Le Scienze» n. 549, maggio 2014.



Adam J. Kucharski è ricercatore presso il Dipartimento di epidemiologia delle malattie infettive della London School of Hygiene and Tropical Medicine.

IMMUNOLOGIA

L'ILLUSIONE DELL'IMMUNITÀ

Sofisticati strumenti matematici suggeriscono che il sistema immunitario potrebbe avere un punto cieco a causa del quale non rileva le sottili mutazioni del virus dell'influenza

di Adam J. Kucharski

IN BREVE

L'infezione di molti tipi di virus patogeni, come quello del morbillo, conferisce un'immunità per tutta la vita, che eviterà di ammalarsi di nuovo delle stessa malattia.

I virus influenzali sono diversi, perché tendono a mutare, cambiando leggermente di anno in anno, ingannando le difese immunitarie dell'organismo.

Alcuni studi hanno suggerito che i primi ceppi influenzali a cui siamo esposti da bambini possano limitare la nostra capacità di rispondere ad altre influenze nel corso degli anni.

Nuove prove a sostegno di questa strana reazione immunitaria, chiamata «peccato originale antigenico», provengono ora anche dai modelli matematici.

Illustrazione di Anna Parini

Se parliamo di malattie infettive, i bambini se la passano male. Non solo trascorrono tutto il giorno in un crogiolo di virus e batteri (solitamente chiamata scuola), ma ancora non hanno il repertorio di difese immunitarie che i loro genitori hanno costruito in una vita: per gran parte delle infezioni, dalla varicella al morbillo, conviene essere un adulto.

L'influenza è un'altra storia. L'analisi della pandemia del 2009 ha mostrato che l'immunità contro i normali virus influenzali di stagione tende a essere più alta nei bambini, per poi scendere nelle persone di mezza età e aumentare di nuovo negli anziani. Gli adulti potrebbero aver sperimentato un'esposizione maggiore alla malattia nel corso della vita, ma - esclusi i più anziani - finiscono per avere una risposta immunitaria molto più debole.

Questa curiosa osservazione ha naturalmente portato i biologi a farsi delle domande. Capire l'infezione da influenza non è semplice, ma nuove informazioni arrivano dai modelli matematici che simulano il sistema immunitario. Questi modelli permettono di studiare come le esposizioni passate al virus influenzale modifichino le successive risposte immunitarie a nuove infezioni e come il livello di protezione cambi nel corso della vita.

Usando questi strumenti matematici insieme ai dati reali, stiamo iniziando a capire i processi da cui nasce l'immunità contro l'influenza. Nel frattempo questo lavoro fornisce un nuovo elemento di sostegno a un'ipotesi peculiare – proposta per la prima volta più di mezzo secolo fa e detta «peccato originale antigenico» – sul motivo per cui la risposta dell'organismo a questa malattia sia legata ai virus incontrati da bambini. Tutte queste indicazioni ci hanno già aiutato a capire perché alcune popolazioni hanno sofferto in modo inaspettato nelle epidemie del passato e potrebbero aiutarci a scegliere i nuovi ceppi influenzali da includere nei vaccini futuri.

Un'epidemia modello

A oggi, quasi tutti i modelli matematici dell'immunità non hanno considerato la reazione dell'organismo al virus influenzale, perché il patogeno è estremamente variabile. Dal punto di vista storico, i modelli si sono concentrati invece sulla reazione a virus come il morbillo, che nel tempo cambiano così poco da conferire l'immunità per tutta la vita. Dopo la prima infezione o la vaccinazione contro il morbillo, il sistema immunitario riconosce velocemente le proteine sulla superficie del virus, genera le molecole anticorpali dirette contro queste proteine, e le cerca per neutralizzare una qualsiasi infezione successiva. (Le proteine di superficie sono dette «antigeni», abbreviazione per *anti*body *gene*rator, generatore di anticorpi.)

Se un individuo ha una certa probabilità di contrarre il morbillo ogni anno, ci si potrebbe aspettare che l'immunità (misurata controllando il livello di anticorpi nel sangue) aumenti gradualmente nel corso degli anni, come è stato verificato in molti studi di laboratorio in diversi gruppi di età. Un modo per testare questa spiegazione è usare un modello matematico che mostri quali schemi ci dovrebbe aspettare nel caso una teoria fosse vera. I modelli sono strumenti molto potenti perché permettono di esaminare gli effetti di processi biologici che potrebbero essere difficili o addirittura eticamente inaccettabili da riprodurre con esperimenti reali. Per esempio, possiamo vedere come un'infezione potrebbe influire sull'immunità in una popolazione senza dover deliberatamente infettare le persone.

Nel modello epidemico più semplice, una popolazione è divisa in tre parti: gli individui suscettibili all'infezione, quelli che si sono ammalati e quelli che sono guariti dalla malattia (e sono quindi immuni). Negli anni ottanta l'epidemiologo Roy M. Anderson e lo zoologo Robert M. May usarono modelli di questo tipo per esaminare la distribuzione per fasce età dell'immunità a una malattia come il morbillo. Il modello a tre gruppi aveva riprodotto piuttosto bene lo schema generale, ma i due ricercatori avevano anche scoperto che nel mondo reale l'immunità nei gruppi più giovani aumentava più velocemente rispetto alle aspettative del modello. Forse succedeva perché i bambini avevano più contatti sociali e quindi maggiore esposizione rispetto agli individui dei gruppi di età più grande? Aggiornando il loro modello per capire questa variazione, i ricercatori testarono questa previsione. Infatti, rifacendo i calcoli in modo da assegnare ai bambini un maggior rischio di infezione, fu possibile riprodurre i cambiamenti immunitari osservati con l'età.

Sfortunatamente l'immunità contro l'influenza non è così semplice. I virus influenzali hanno un tasso di mutazione molto elevato, ovvero i loro antigeni possono cambiare aspetto da un anno all'altro. Come risultato il nostro organismo fatica a riconoscere un nuove ceppo. Questa variabilità è la ragione per cui i vaccini antinfluenzali devono essere aggiornati di frequente; diversamente dal virus del morbillo, che è uguale ogni anno, gli antigeni del virus dell'influenza cambiano nel corso del tempo.

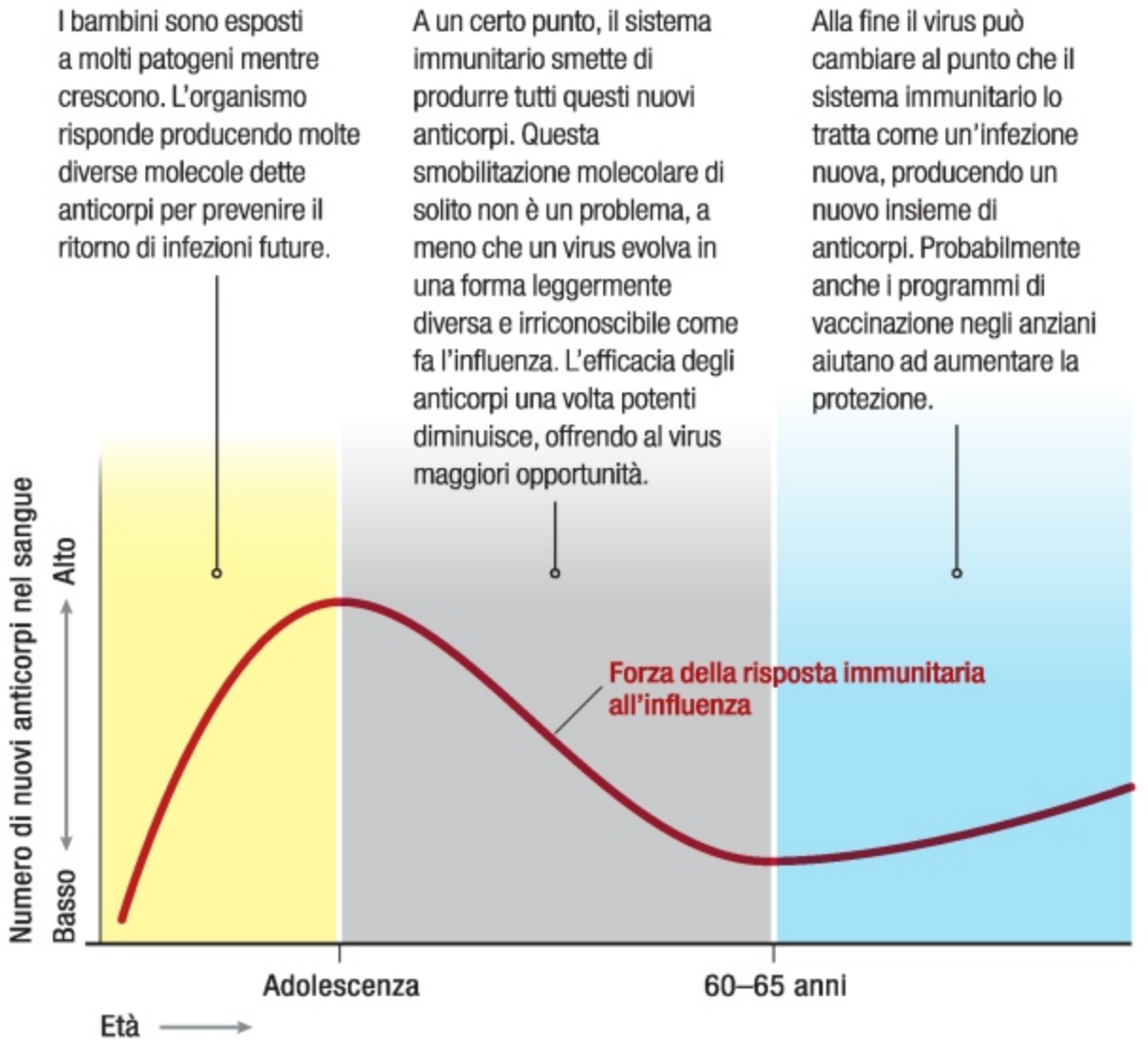
Quando sono venuto a sapere dell'insolita distribuzione per età dei dati sull'immunità antinfluenzale nel 2009, mi sono chiesto se il tasso elevato di mutazione del virus dell'influenza, insieme ai tanti contatti sociali tra bambini, potesse spiegare l'andamento dell'immunità – alta, bassa, di nuovo alta – nei diversi gruppi di età. Dato che gli individui sono esposti a un gran numero di infezioni da giovani, hanno buone probabilità di sviluppare una buona immunità a lungo termine contro gran parte dei virus in circolo durante la loro infanzia. Nel caso dell'influenza, i bambini sviluppano gli anticorpi contro gli antigeni dei virus influenzali specifici che incontrano, proprio come fanno per il morbillo.

Dopo la scuola superiore o l'università, in media si incontrano meno persone, e quindi in genere si prenderà l'influenza meno di frequente. Questo cambiamento nell'esposizione significa che gli adulti sfruttano gli anticorpi che hanno prodotto da bambini per proteggersi dai nuovi assalti, ma dato che il virus dell'influenza muta, i «vecchi» anticorpi degli adulti diventano meno efficaci nel riconoscere i nuovi ceppi. Di conseguenza ci si aspetterebbe una decrescita dei livelli di protezione naturale nelle persone di mezza età, le quali, come gruppo, non ricevono regolarmente una vaccinazione. E la successiva crescita dell'immunità negli anziani potrebbe essere dovuta proprio ai frequenti vaccini, che mantengono aggiornati gli anticorpi.

IL MECCANISMO DI UN MISTERO

La prima impressione dura a lungo

Di solito, quando il corpo umano sconfigge un virus, il sistema immunitario fornisce per tutta la vita una protezione contro le infezioni future di quello stesso patogeno. In circostanze normali, quindi, gli adulti dovrebbero avere difese più forti rispetto ai bambini, e ammalarsi di meno. Questo non succede con l'influenza. L'immunità cresce nell'infanzia, secondo le attese, ma poi si diventa più vulnerabili da adulti. Una possibile spiegazione è che il sistema immunitario sviluppi una sorta di punto cieco per l'influenza, aspettandosi che le infezioni successive del virus altamente variabile siano simili a quelle del passato. Poiché l'organismo riserva le sue reazioni più forti per minacce che in realtà sono datate, fa più fatica a combattere le infezioni successive.



Fonte: *The Role of Social Contacts and Original Antigenic Sin in Shaping the Age Pattern of Immunity to Seasonal Influenza*, di Adam J. Kucharski e Julia R. Gog, in «PLoS Computational Biology», VOL. 8, n. 10, article n. e1002741, 25 ottobre 2012

Tutto questo in teoria, ma il problema era testare l'ipotesi. Data la variabilità dell'influenza, costruire un modello matematico è molto più difficile rispetto al morbillo. Se un individuo fosse immune a un ceppo, potrebbe essere solo parzialmente immune a un altro, o del tutto suscettibile a un terzo. Per studiare l'immunità dobbiamo quindi tracciare con precisione le combinazioni di ceppi a cui i soggetti sono stati esposti, e in che ordine è avvenuta l'esposizione.

Questo è il punto in cui la faccenda diventa complicata, a causa del gran numero di combinazioni di ceppi che ognuno di noi può incontrare. Per esempio, se negli anni fossero circolati 20 diversi ceppi, ci sarebbero 2^{20} (cioè, più di un milione) storie possibili di infezione per ogni individuo. Per 30 ceppi, si parla di oltre un miliardo di combinazioni per ogni individuo.

Insieme a Julia R. Gog, allora mia relatrice per il dottorato all'Università di Cambridge, ho cercato un modo per aggirare questa montagna di complessità. Abbiamo capito che se gli individui hanno una certa probabilità di essere colpiti dall'influenza ogni anno le probabilità di essere semplicemente esposti a due ceppi qualsiasi dovrebbero essere indipendenti una dall'altra. (In altre parole, l'esposizione al ceppo A non dovrebbe influire sulla probabilità di incontrare il ceppo B). Quindi, per ragioni matematiche di base, avremmo potuto ricostruire la probabilità per cui un individuo qualsiasi sia esposto a una certa combinazione di infezione semplicemente moltiplicando le probabilità di esposizione a ogni singolo ceppo della combinazione. Ciò significa che invece di gestire un milione di probabilità per 20 diversi ceppi, avremmo avuto a che fare solo con 20 probabilità.

Tuttavia, una prima simulazione del modello non ci aveva dato i risultati sperati. Testardamente, il modello suggeriva che se una persona era stata precedentemente esposta a un ceppo, allora avrebbe avuto una maggiore probabilità di essere stata esposta anche un altro ceppo. Era come se il nostro modello ci stesse dicendo che essere colpito da un fulmine rende più probabile essere stato esposto all'influenza: una conclusione evidentemente assurda.

La ragione di questo risultato apparentemente senza senso si era poi rivelata semplice: non avevamo considerato l'età del soggetto. Visto che l'infezione avviene con tassi più o meno costanti, più a lungo si vive più probabile sarà infettarsi. Se quindi consideriamo un individuo a caso, e scopriamo che era stato esposto all'influenza (o colpito da un fulmine), immediatamente sappiamo anche che molto probabilmente è più vecchio che giovane. E, dato che è più vecchio, sappiamo anche che probabilmente ha avuto altre sfortune, per esempio l'esposizione a un secondo ceppo influenzale.

Tuttavia, finché consideravamo ciascun gruppo di età in modo separato, le infezioni tornavano a essere variabili indipendenti. Quindi per 20 ceppi non avevamo più un milione di cose di cui tenere conto: di nuovo, ne avevamo solo 20. Con un modello gestibile a disposizione, abbiamo iniziato a simulare il modo in cui l'immunità all'influenza cambia nel tempo. Lo scopo era generare dati artificiali da confrontare con i risultati reali. Oltre alla mutazione dei virus nel corso degli anni, abbiamo ipotizzato che il rischio di infezione dipendesse anche dal numero dei contatti sociali riportati in sondaggi sulla popolazione tra e nei diversi gruppi di età.

Anche con questi cambiamenti il nostro modello, che ipotizzava che la riduzione dell'immunità doveva emergere per la minore esposizione, non era in grado di riprodurre il fenomeno reale. Il modello non era completamente sbagliato: mostrava infatti che i bambini sviluppano un'immunità più forte degli adulti. Tuttavia, mentre la caduta reale dei livelli anticorpali avviene tra i 5 e i 10 anni di età, nel nostro modello avveniva tra i 15 e i 20 anni di età: dopo che i soggetti avevano lasciato la scuola (dove ci sono un tante persone e germi).

Il peccato originale

Mentre eravamo alle prese con il rompicapo degli schemi dell'influenza legati all'età, avevo discusso con molte persone del problema della modellizzazione. In particolare avevo parlato con Andrea Graham, biologa evoluzionista della Princeton University che mi introdusse al concetto di peccato antigenico originale. Ora che avevamo un modello che poteva gestire un gran numero di ceppi, mi domandavo se considerare questa ipotesi avrebbe aiutato il nostro modello a produrre risultati più realistici. Poiché l'idea era comunque controversa, mi chiedevo anche se includerla nel modello avrebbe indicato se fosse plausibile o no.

Come il concetto biblico, il peccato antigenico originale è la storia del primo incontro tra un'entità vergine (il sistema immunitario) e una minaccia (il patogeno). Nella versione immunologica, l'organismo è così segnato dal suo primo contrattacco efficace contro l'influenza che ogni infezione successiva innescherà di nuovo gli anticorpi originali. L'organismo produce questi anticorpi anche quando incontra un insieme di antigeni leggermente diversi su un patogeno che richiederebbe un insieme diverso di anticorpi per una risposta efficace. Allo stesso tempo, l'organismo non riesce a produrre una buona scorta di anticorpi contro il patogeno con l'insieme alterato di antigeni, perché si basa sulla risposta immunitaria a virus che ha già incontrato.

Il virologo Thomas Francis Jr. fu il primo a osservare questo problema, nel 1947. Nonostante un programma di vaccinazione portato a termine nell'anno precedente, gli studenti dell'Università del Michigan si ammalavano a causa di un nuovo, sebbene imparentato, ceppo di influenza. Quando Francis aveva confrontato l'immunità dal ceppo del vaccino con quella dal nuovo virus, aveva osservato che gli studenti avevano anticorpi efficaci contro il ceppo vaccinale ma non contro il virus dell'anno successivo.

La risposta immunitaria sarebbe dettata da tutti i ceppi influenzali incontrati da una persona nel corso della vita

Francis propose una spiegazione secondo cui, invece di sviluppare anticorpi per ogni nuovo virus incontrato, il sistema immunitario potrebbe riproporre una reazione uguale a quella suscitata da virus simili. In altre parole, i ceppi del passato e l'ordine in cui gli individui li incontrano potrebbero essere molto importanti per determinare l'efficacia della risposta a successivi focolai epidemici del sempre variabile virus dell'influenza. Francis battezzò il fenomeno «peccato originale antigenico»: forse, come ipotizzato dall'epidemiologo David Morens, «per una religiosa riverenza nei confronti della bellezza della scienza, o per la passione per la comicità alimentato dalle pause a base di Martini che amava così tanto».

Negli anni sessanta e settanta, i ricercatori trovarono ulteriori prove a sostegno del peccato originale antigenico, negli esseri umani e in altri animali. Da allora però altre ricerche hanno messo in dubbio questo fenomeno. Nel 2008 alcuni ricercatori della Emory University hanno esaminato i livelli anticorpali in volontari che avevano appena ricevuto il vaccino, e hanno osservato che il loro sistema immunitario era efficace nel combattere i ceppi somministrati. La conclusione è stata che il peccato originale antigenico «non sembra comune in adulti sani che si vaccinano contro l'influenza». L'anno successivo, un altro gruppo di ricerca della stessa università guidato dall'immunologo Joshy Jacob, ha osservato che nei topi un'infezione con un virus influenzale vivo, non inattivato come invece sono quelli dei vaccini, poteva ostacolare la risposta immunitaria successiva nei confronti di altri ceppi, suggerendo ancora una volta che il peccato originale antigenico possa avere un ruolo importante nell'infezione naturale.

Jacob ha proposto una spiegazione biologica per il peccato originale antigenico, ipotizzando che potrebbe avere origine proprio alla radice del processo di generazione dei linfociti B. Queste cellule sono parte della risposta immunitaria: durante un'infezione sono programmate per riconoscere una specifica minaccia e produrre anticorpi che la combattano. Alcuni linfociti B rimangono nell'organismo anche dopo l'infezione, pronti a spargere nuovi anticorpi nel caso compaia la stessa minaccia. Second Jacob, l'infezione con virus influenzali vivi potrebbe stimolare le cellule di memoria esistenti, invece di spingere l'organismo a produrre nuove cellule B. Supponiamo che l'anno scorso siate stati infettati dal virus influenzale e quest'anno vi siate presi un virus leggermente diverso. Poiché i linfociti B memoria hanno già visto il virus simile dello scorso anno, possono eliminare l'infezione prima che l'organismo abbia il tempo di sviluppare nuovi linfociti B specifici per il ceppo di quest'anno, quindi anche migliori nel ricordarlo nel futuro. È come il vecchio adagio militare sui generali che combattono sempre l'ultima guerra (soprattutto se la vincono). Sembra che il sistema immunitario dipenda più dall'uso delle difese passate che dalla generazione di nuove difese, specialmente se la vecchia strategia funziona bene e più rapidamente.

Nelle ultime fasi del mio dottorato abbiamo adattato il nostro modello per simulare il peccato originale antigenico. Questa volta il declino dell'immunità emergeva proprio quando avviene nella vita reale: intorno ai sette anni (invece dell'intervallo 15-20 anni che avevamo visto precedentemente), quando si è abbastanza vecchi da aver incontrato almeno un virus influenzale. Il nostro modello suggeriva che da quel punto in poi le infezioni precedenti compromettevano la produzione di anticorpi efficaci. Poiché tipicamente i soggetti più giovani dei paesi che abbiamo studiato non erano vaccinati, questo effetto è probabilmente dovuto all'infezione naturale. Non è ancora chiaro che cosa provochi l'aumento dell'immunità negli anziani. In parte potrebbe essere il risultato dell'incremento delle vaccinazioni per questa fascia d'età, oppure in parte potrebbe essere dovuto al fatto che quelle persone hanno vissuto così a lungo che gli antigeni di un qualsiasi ceppo influenzale nuovo a cui sono esposte sono molto diversi e il sistema immunitario non può confonderli con quelli incontrati durante l'infanzia. In ogni caso, i nostri risultati hanno suggerito che il peccato originale antigenico è responsabile della strana distribuzione per età dell'immunità nei giovani, e non il numero di contatti sociali e quindi le possibilità di esposizione.

Punti ciechi

Convinti del fatto che il peccato originale antigenico possa dare forma al profilo immunologico di un'intera popolazione, abbiamo voluto vedere se le risposte immunitarie fuorviate potessero avere un effetto sulla dimensione di un'epidemia. Nelle simulazioni abbiamo visto che ogni tanto il modello generava epidemie più grandi, anche se il nuovo virus non era particolarmente diverso da quello dell'anno precedente. Sembrava che il peccato originale antigenico lasciasse varchi dell'immunità di certe fasce d'età: nonostante i soggetti fossero stati esposti a ceppi che avrebbero potuto proteggerli, il loro sistema immunitario avrebbero generato gli anticorpi «sbagliati» in risposta alla nuova infezione.

Mai sottovalutare l'influenza: negli anni trenta fu necessario costruire ospedali temporanei per gestire il gran numero di pazienti colpiti dall'influenza.

Getty Images

I migliori indizi storici a sostegno di questa ipotesi provengono da un'epidemia del 1951, quando l'influenza colpì Liverpool, nel Regno Unito, in un'ondata che lì fu più veloce e mortale della famosa Spagnola del 1918. Anche le due pandemie successive, del 1957 e del 1968, impallidirebbero al confronto. Tuttavia, non è chiaro che cosa abbia reso così grave quell'episodio.

La spiegazione più logica è che il ceppo del 1951 fosse molto diverso dal ceppo del 1950, e quindi molti soggetti non avrebbero avuto una risposta immunitaria efficace nei confronti del virus. Ma in realtà non sembra che il ceppo del 1951 fosse così diverso da quello dell'anno precedente. Inoltre la dimensione dell'epidemia nel Regno Unito e altrove era molto variabile. In alcune aree, come l'Inghilterra (e Liverpool in particolare) e il Galles, l'influenza colpì duramente, mentre in altre, come gli Stati Uniti, non ebbero molte differenze nella mortalità rispetto agli anni precedenti. Più di recente, in Regno Unito le due epidemie del 1999 e del 2000 sono state particolarmente violente, ma non ci sono prove che il virus fosse particolarmente diverso in quegli anni.

Tuttavia il nostro modello matematico poteva generare condizioni simili alle epidemie del 1951, 1999 e 2000. Introducendo l'ipotesi del peccato originale antigenico, l'ordine in cui i diversi ceppi infettano i differenti gruppi per età avrebbe modificato il modo in cui i diversi soggetti rispondevano alle infezioni future. In altre parole, quando si parla di influenza, ogni area geografica potrebbe avere il suo peculiare profilo immunitario, leggermente diverso da quello dei vicini, con i suoi peculiari «punti ciechi» immunitari. Epidemie gravi come quella di Liverpool potrebbero quindi essere state causate da punti ciechi, che altre aree semplicemente non avevano perché avevano un peccato originale antigenico diverso.

Perfezionare il peccato originale

La ricerca sull'immunità all'influenza si è spesso concentrata su argomenti specifici, in particolare l'efficacia di un particolare vaccino o la dimensione di un'epidemia in un certo anno. Ma questi problemi sono in realtà parte di un problema più ampio: come sviluppiamo e conserviamo l'immunità all'influenza e ad altri virus che cambiano il proprio genoma nel corso del tempo? Come possiamo usare questa informazione per migliorare i vaccini?

Progetti come FluScape, nella Cina meridionale, iniziano ad affrontare il problema. Un'analisi preliminare di Justin Lessler della Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health ha suggerito che il concetto di peccato originale antigenico vada perfezionato. I risultati sembrano indicare che la risposta immunitaria non sia dettata solo dal primo ceppo incontrato da un soggetto, ma che invece ci sia una gerarchia. Il ceppo responsabile della prima infezione si guadagna il posto da «decano» della risposta immunitaria, con il ceppo successivo che genera una risposta in qualche modo più debole, seguita da una risposta ancora più debole per il terzo ceppo, in una gerarchia di anzianità che si applicherebbe solo ai virus altamente variabili, come quello dell'influenza.

Poiché FluScape ha analizzato i campioni di sangue prelevati oggi, Lessler non ha potuto vedere il cambiamento dei livelli anticorpali nel corso del tempo. Ad agosto 2013, però, ricercatori dell'Icahn School of Medicine del Mount Sinai hanno esaminato una serie di campioni prelevati da 40 soggetti in un periodo di vent'anni. I risultati sostengono l'idea di anzianità antigenica: ogni nuova infezione influenzale incrementava i livelli degli anticorpi contro i ceppi incontrati nel passato. Le risposte immunitarie sono quindi più forti contro i virus incontrati prima nel corso della vita rispetto ai virus incontrati più di recente.

Negli ultimi due anni ho collaborato con FluScape per analizzare i dati provenienti dalla Cina. Un vantaggio di questo lavoro è che potrebbe aiutare a identificare quali ceppi vadano inclusi nel vaccino antinfluenzale del prossimo anno, una decisione che presa con mesi di anticipo. Con nuovi modelli e dati migliori, stiamo iniziando a capire come singoli individui e popolazioni creino l'immunità all'influenza. Se il passato ci insegna qualcosa, siamo sicuri che ci aspettano altre sorprese. ■

PER APPROFONDIRE

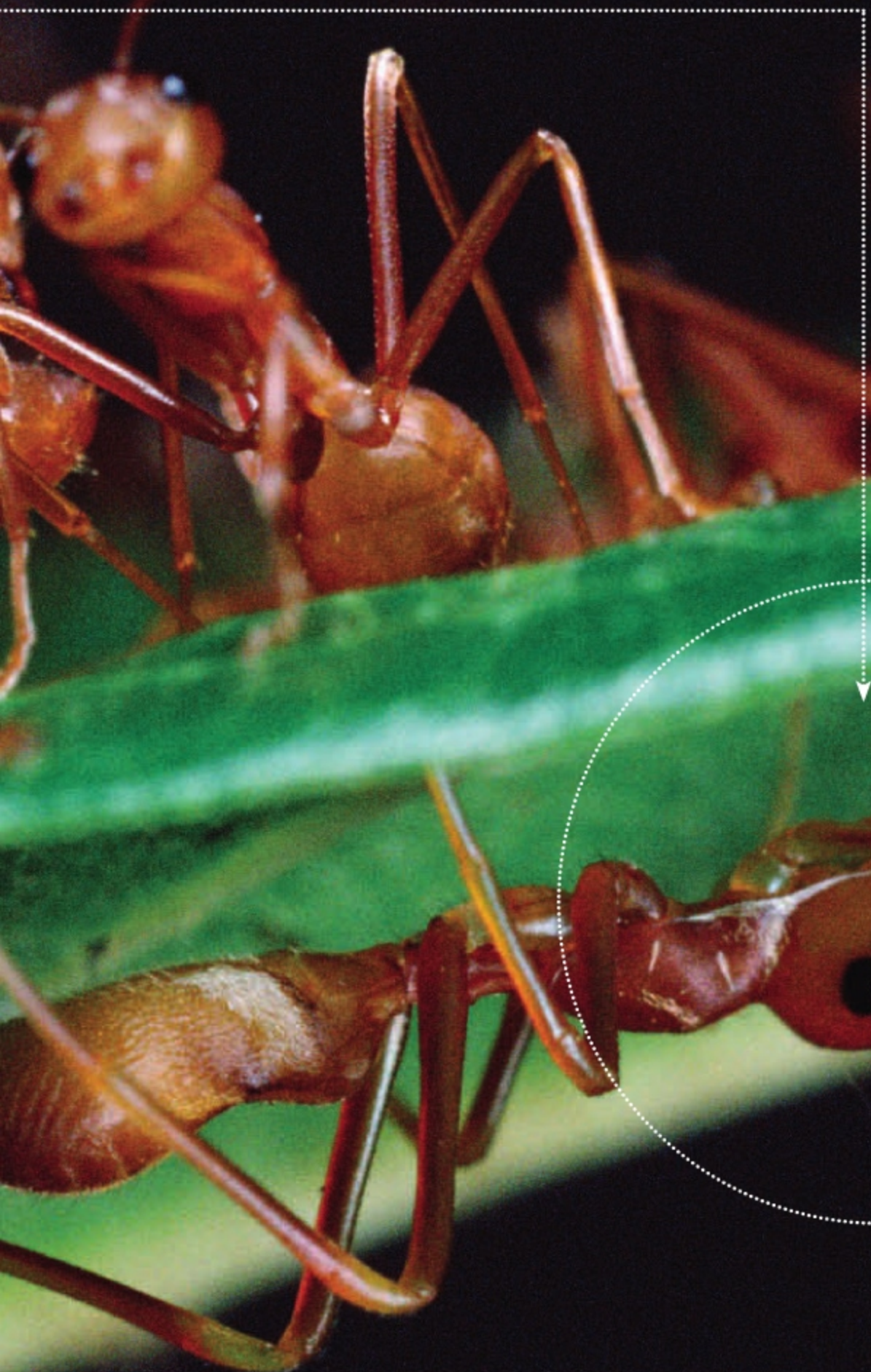
Original Antigenic Sin Responses to Influenza Viruses. Kim J.H. e altri, in «Journal of Immunology», Vol. 183, n. 5, pp. 3294-3301, 1° settembre 2009.

Evidence for Antigenic Seniority in Influenza A (H3N2) Antibody Responses in Southern China. Lessler J. e altri, in «PLOS Pathogens», Vol. 8, n. 7, articolo n. e1002802, 19 luglio 2012.

The Role of Social Contacts and Original Antigenic Sin in Shaping the Age Pattern of Immunity to Seasonal Influenza. Kucharski A.J. e Gog J.R., in «PLoS Computational Biology», Vol. 8, n. 10, articolo n. e1002741, 25 ottobre 2012.

Neutralizing Antibodies against Previously Encountered Influenza Virus Strains Increase over Time: A Longitudinal Analysis. Miller M.S. e altri, in «Science Translational Medicine», Vol. 5, n. 198, articolo n. 198ra107, 14 agosto 2013.

Lo straniero in mezzo a noi.
Un ragno imitatore si apposta sotto un gruppo di formiche tessitrici asiatiche, la specie a cui l'evoluzione lo ha reso simile.



SCIENZE NATURALI

La messinscena del ragno

Alcuni aracnidi fanno davvero di tutto per imitare l'aspetto e il comportamento delle formiche

di Ximena Nelson

Ximena Nelson insegna comportamento animale all'Università del Canterbury di Christchurch, in Nuova Zelanda. È specializzata in studi cognitivi e di comunicazione, in particolare su ragni salticidi e uccelli.

Il regno animale è pieno di impostori. Prendete un qualunque testo di zoologia, date un'occhiata alla descrizione del mimetismo – il fenomeno per cui una specie si evolve per assomigliare a un'altra – e incontrerete diversi esempi classici, come la farfalla viceré che imita la farfalla monarca, il serpente *Lampropeltis elapsoides* che copia il serpente corallo, gli insetti sirfidi che si camuffano da api. Imitatori meno conosciuti, ma per molti versi ancora più affascinanti, sono i ragni salticidi del genere *Myrmarachne*, che tutti scambiano per formiche.

A differenza degli altri salticidi, tondeggianti e pelosi, i *Myrmarachne* hanno un corpo liscio e luccicante che dà l'illusione di essere formato da tre parti distinte (testa, torace e addome), come quello delle formiche. Per completare la messinscena, i ragni camminano solo su tre paia di zampe e sollevano il paio anteriore sulla testa, agitandolo per simulare le antenne delle formiche. Adottano persino la locomozione veloce, erratica e incessante delle formiche invece dei movimenti a scatti tipici degli altri salticidi. È un'interpretazione da premio Oscar, ed è il segreto del successo di questo gruppo: oltre 200 specie di *Myrmarachne* prosperano nelle foreste tropicali di Africa, Asia, Australia e America. Una tale diversità fa dell'imitazione delle formiche la forma più comune di mimetismo. Eppure è la meno conosciuta.

Nuove ricerche hanno però cominciato a svelare la sbalorditiva complessità di questa sceneggiata. Come la farfalla, il serpente e i sirfidi, anche i *Myrmarachne* sopravvivono grazie alla loro somiglianza ad altri animali, in questo caso alcune specie di formiche letali: i predatori di ragni si tengono alla larga sia dalle formiche sia dai loro sosia. Ma quel vantaggio ha un prezzo: per dare un'interpretazione convincente i ragni devono esporsi a un notevole rischio. Le forze evolutive che hanno portato al bluff hanno anche costretto i ragni imitatori di formiche a vivere sul sottile confine tra evitare un nemico e cadere preda di un altro. Rivelando i pericoli inaspettati dell'imitazione, gli studi su questi formidabili aracnidi ci mostrano il fenomeno sotto una nuova luce.

L'arte del fingere

Il mio amore per il mimetismo nacque un giorno del 1995 nell'ufficio di Robert Jackson, all'epoca mio relatore, mentre discutevamo sui possibili argomenti per la mia tesi di specializzazione. Jackson era ricercatore all'Università del Canterbury, in Nuova Zelanda, e si era affermato come aracnologo per i suoi studi su *Portia*, un genere di ragni salticidi noti per i loro livelli di comportamento intelligente quasi da mammiferi; mi propose quindi di lavorare su una specie di *Portia* e poi mi parlò dei salticidi imitatori che si trovano ai tropici. Ne fui immediatamente incuriosita. A vent'anni di distanza io e Jackson condividiamo un laboratorio e abbiamo esplorato l'Africa, l'Asia e l'Australia per studiare queste ragguardevoli creature. Nel corso dei nostri viaggi abbiamo scoperto molte conseguenze bizzarre dell'imitazione, che sottolineano come il gioco dell'inganno sia molto più complesso di quanto suggerisca il senso comune.

Il modello tradizionale nacque con il naturalista inglese Henry Walter Bates, che nel 1861 sviluppò la prima teoria scientifica del mimetismo sulla base di osservazioni sulle farfalle dell'Amazzonia. Se una specie commestibile somiglia a una immangiabile, o addirittura tossica, pensò Bates, ci guadagna in sopravvivenza, convincendo con l'inganno i potenziali predatori a lasciarla in pace. Nello scenario immaginato da Bates, l'esperienza insegnerebbe ai predatori che mangiare la specie disgustosa è una cattiva idea: dopo il primo incontro sgradevole i predatori eviteranno sia la specie tossica sia i suoi imitatori, anche se sono innocui. Una messinscena «parassitica» come questa, con una specie che sfrutta le difese di un'altra, è oggi nota come mimetismo batesiano.

Ma ora si è capito che il mimetismo non lavora solo nel modo semplice e lineare descritto da Bates, tutt'altro. Alcuni imitatori, per esempio, sfruttano la propria somiglianza con un'altra specie non per evitare di essere mangiati, ma per ingannare le prede: è il cosiddetto mimetismo aggressivo. E gli animali usano l'imitazione per varie altre ragioni. Per mostrare la complessità di questa strategia, e le forze evolutive che l'hanno plasmata, non c'è gruppo di organismi migliore dei ragni imitatori di formiche.

Le due facce della medaglia

Un non esperto potrebbe pensare che non valga la pena di imitare le formiche. Ma nella foresta pluviale, dove la loro biomassa totale supera quella di tutti i vertebrati assieme, le formiche sono importanti modellatori dell'ambiente e hanno un grande potere su chi ci vive. Di conseguenza sono ottime candidate all'imitazione.

I ragni *Myrmarachne* sfruttano la temibile reputazione delle formiche: queste difendono fieramente i loro nidi dagli intrusi con morsi e punture, e un singolo individuo può reclutare l'intera co-

IN BREVE

Il mimetismo è il fenomeno per cui una specie diventa simile a un'altra nel corso dell'evoluzione.
Le specie che si camuffano da formiche sono il tipo più comune di mimi, eppure sono rimaste a lungo le meno comprese.
Studi recenti, tuttavia, mostrano il dietro le quinte di questi artisti dell'imitazione, e così facendo ci svelano che il mimetismo è ben più complesso di quanto si pensasse.
Abbiamo scoperto che gli animali lo sfruttano per molte ragioni diverse, e che pagano il prezzo dei suoi vantaggi.

Pagine precedenti: Mark Moffett National Geographic

lonia per l'attacco, con conseguenze spesso letali per l'invasore. I predatori, quindi, si guardano bene dal mangiare qualunque preda che somigli a una di quelle formiche. Per raggirare i predatori e non farsi attaccare i ragni devono però correre dei rischi reali. Per prima cosa devono vivere vicino alle formiche, per evitare di spiccare agli occhi del predatore come qualcosa che non si comporta da formica. Vivere a stretto contatto con altri individui, cosa insolita nei ragni ma comune nelle formiche, li espone a un rischio diretto: se si scopre che sono impostori ci sono buone probabilità che diventino pranzo.

Coabitare con i propri nemici, tuttavia, non è l'unico prezzo che devono pagare i ragni imitatori. La frode è così convincente che i predatori specializzati in formiche – comprese altre specie di salticidi – li attaccano come se fossero prede. E la competizione tra i maschi per l'accesso alle femmine ha aumentato il rischio di predazione.

I gusti difficili delle femmine hanno infatti portato i maschi di *Myrmarachne* a evolvere mandibole ingrossate che ne aumentano la lunghezza del corpo anche del 50 per cento. Il motivo esatto per cui le femmine preferiscano maschi con la bocca grande non è noto, anche se si pensa che il carattere sia indice di buona salute. Si potrebbe pensare, di primo acchito, che una mandibola più grossa riduca le possibilità di sopravvivenza perché rende i ragni meno simili a formiche. Tuttavia il modo in cui li danneggia è un altro: quel carattere li fa somigliare a formiche che stanno trasportando qualcosa in bocca. Dato che le mandibole delle formiche sono molto pericolose, i ragni che le predano tendono ad attaccarle preferibilmente quando trasportano oggetti in bocca e perciò non sono in grado di mordere i loro aggressori. Di fatto, una bocca grande, anche se aiuta i maschi di *Myrmarachne* a conquistare le femmine, ha anche lo sgradito effetto di renderli più attraenti ai predatori.

Da alcune minacce questi scaltri imitatori sanno difendersi attivamente, e la loro flessibilità comportamentale è sorprendente. Quando un altro ragno predatore comincia il suo agguato, per esempio, l'imitatore esegue una particolare sequenza di movimenti: solleva le zampe anteriori, tipicamente portate a mo' di antenne, e le tiene dritte sopra la testa, fissando l'altro ragno senza muoversi. La sequenza sembra comunicare al predatore che ha davanti un ragno, o perlomeno non una formica. In un caso o nell'altro, il messaggio è un deterrente efficace. Allo stesso modo, quando uno scienziato molesto (e verosimilmente anche un potenziale predatore) si avvicina e cerca di catturare un *Myrmarachne* attaccato a una pianta, l'imitatore interrompe il comportamento da formica, si lascia cadere dalla vegetazione e sparisce alla vista. Quando si dice avere tutto nella vita.

Un imitatore particolarmente machiavellico, *Myrmarachne melanotarsa*, riesce ad avere tutto nella vita in un altro modo ancora, ribaltando il concetto che forme parassitiche e aggressive siano fenomeni indipendenti, prodotti da pressioni selettive diverse. La somiglianza di *M. melanotarsa* alle formiche è terrificante per gli altri ragni salticidi al punto che, oltre a usare il proprio aspetto per evitare la predazione, se ne serve per cacciare: fa scappare le sventurate femmine dai loro nidi, poi entra a fare razzia di uova e ragnetti. Le formiche hanno difficoltà a razziare quei nidi perché le loro gambe restano impigliate nella seta delle ragnatele, ma i ragni hanno adattamenti specifici per manipolare quei filamenti appiccicosi, e *M. melanotarsa* li sfrutta fino in fondo.

Per chiarire una volta per tutte le forze che hanno permesso al mimetismo di evolversi e assumere le forme che conosciamo, gli scienziati devono prima capire i motivi per cui i predatori evitano gli impostori. Ai suoi tempi Bates pensava che un predatore dovesse anzitutto fare esperienza del rischio rappresentato dalla specie pericolosa, per capire che gli conveniva stare alla larga dall'originale e da tutte le sue imitazioni.

Ma ancora una volta gli imitatori di formiche sfidano il modello tradizionale. I salticidi non imitatori che evitano di mangiare sia le formiche sia *Myrmarachne* lo fanno per istinto, non dopo averlo appreso da una brutta esperienza. In altre parole, le forze che plasmano l'evoluzione hanno infuso questo comportamento nei circuiti innati dei predatori.

A ben vedere, la cosa non deve sorprendere: dopotutto, un animale che incontra una formica e muore non ha modo di imparare granché. In un certo senso è piuttosto facile immaginare come possa essersi evoluta una repulsione istintiva: quei predatori che per qualsiasi motivo preferiscono non avvicinarsi alle formiche sopravvivono e si riproducono con maggiore probabilità, e i loro geni sono trasmessi con successo; a un certo punto l'avversione innata domina la popolazione, e chi non presenta il carattere è eliminato rapidamente dalle stesse formiche.

Un gran bel pasticcio

La complessità che io e i miei colleghi abbiamo scoperto in *Myrmarachne* contiene una lezione: gli intricati principi in atto in questo caso valgono quasi di sicuro anche in altri casi di mimetismo. E ci resta ancora molto da scoprire.

Finora gli scienziati hanno visto il mimetismo per lo più come adattamento alle pressioni selettive di un unico predatore che usa un unico senso, la vista (dato che gli umani dipendono tanto a fondo dalla vista, è su quel senso che i ricercatori tendono a concentrarsi). Ma ora sappiamo da *Myrmarachne* che a plasmare una specie imitatrice sono molti predatori diversi: il mio lavoro, in sé, ha mostrato che hanno un ruolo anche gli altri ragni salticidi e le mantidi, e forse anche uccelli, lucertole e rane. Le ricerche su altri animali suggeriscono che l'imitazione può coinvolgere altri sensi tra cui l'olfatto e l'udito. Per esempio c'è una specie non tossica di falena che imita i segnali acustici di una specie tossica in modo da non farsi predare da pipistrelli ecolocalizzatori; e alcune farfalle copiano i segnali chimici emessi dalle formiche per entrare nei loro nidi ben protetti e deporre le proprie uova al sicuro.

È emozionante pensare che oggi abbiamo la tecnologia per sondare le esperienze sensoriali di altre specie. I registratori ad alta frequenza ci permettono di rivelare suoni al di sopra del nostro campo uditivo, inclusi quelli emessi da falene e pipistrelli; la spettrometria di massa ci mostra il profilo degli idrocarburi nelle formiche e nei loro imitatori, fornendo un quadro delle loro interazioni chimiche. Applicare queste tecniche allo studio del mimetismo e di altri fenomeni naturali svelerà di certo altre soluzioni spettacolari e altri compromessi che si sono evoluti nell'eterna corsa agli armamenti tra predatori e prede. ■

PER APPROFONDIRE

Collective Batesian Mimicry of Ant Groups by Aggregating Spiders. Nelson X.J. e Jackson R.R., in «Animal Behaviour», Vol. 78, pp. 123-129, luglio 2009.

Specialized Exploitation of Ants (Hymenoptera: Formicidae) by Spiders (Araneae). Jackson R.R e Nelson X.J., in «Myrmecological News», Vol. 17, pp. 33-49, agosto 2012.

Un ragno saltatore che costruisce la tela. Jackson R.R., in «Le Scienze» n.207, novembre 1985.

Sferzate dal vento, le onde dell'oceano hanno intrappolato nel ghiaccio questo faro in Michigan, negli Stati Uniti, durante una violenta tempesta invernale.

CLIMA

Gli strani percorsi della CORRENTE A GETTO

Le estati e gli inverni estremi degli ultimi quattro anni potrebbero diventare la norma a causa del comportamento anomalo di un fiume di venti atmosferici

di Jeff Masters

Thomas Zakowski/Landov

IN BREVE

Negli ultimi quattro anni abbiamo assistito a forti ondate di maltempo quando la corrente a getto ha deviato dal suo tragitto abituale collocandosi su percorsi tortuosi ed estremi.

Quando la corrente è entrata in stallo in questa configurazione si sono registrati periodi di tempo anomalo. Per alcuni scienziati lo strano comportamento della corrente è dovuto alla fusione dei ghiacci artici, altri non sono d'accordo.

In ogni caso, una corrente a getto più estrema implicherà maggiori siccità, alluvioni, ondate di calore e inverni rigidi in molte parti del pianeta.

Jeff Masters è direttore di meteorologia presso Weather Underground, che ha contribuito a fondare nel 1995, ed è specializzato nella previsione di eventi meteo gravi. È anche autore di WunderBlog, uno dei più popolari blog sul clima.

Da novembre 2013 fino a tutto gennaio 2014 la corrente a getto ha assunto una forma particolarmente tortuosa e duratura su Nord America ed Europa. Questo fiume di venti che circondano il globo soffiando verso est nella parte alta dell'atmosfera si è spinto insolitamente a sud sugli Stati Uniti orientali, permettendo al famigerato «vortice polare» di aria fredda che turbina sull'Artico di gettarsi a sud e chiudere i due terzi orientali del paese in una morsa di freddo intenso. La copertura di ghiaccio sui Grandi Laghi ha raggiunto la seconda massima estensione di sempre, e due rovinose tempeste di ghiaccio e neve hanno bloccato la città di Atlanta per diversi giorni.

Nello stesso periodo un ostinato promontorio di alta pressione rivestiva la California dando origine all'inverno più caldo mai registrato nella regione. Nonostante il tepore potesse sembrare gradevole, la conseguente siccità è stata la peggiore da quando, nel tardo 1800, si è iniziato a tenerne traccia, e in agricoltura ha causato perdite per miliardi di dollari.

La deformazione della corrente a getto ha colpito anche l'Europa, dove una successione di intensi temporali ha provocato miliardi di dollari di danni. Inghilterra e Galles hanno assistito all'inverno più umido dal 1766, mentre buona parte del resto dell'Europa si è crogiolata in un tepore inconsueto: la Norvegia è stata colpita in gennaio da una serie di incendi senza precedenti, mentre a Sochi, in Russia, gli ufficiali di gara dovevano lottare per mantenere innevati gli impianti per le Olimpiadi invernali. A maggio circa un terzo della Bosnia è stata allagata a causa di un violento nubifragio.

Di norma la corrente a getto somiglia a una banda d'aria che soffia attorno al globo alle medie latitudini. Come osserviamo dalle previsioni del tempo alla televisione, spesso si piega dolcemente da nord verso sud, poi torna a nord, e ricorda più o meno l'immagine di un'onda sinusoidale su un oscilloscopio. Le anse che disegna sono chiamate onde planetarie, o di Rossby: di solito impiegano dai tre ai cinque giorni per attraversare gli Stati Uniti, e generano la maggior parte dei fenomeni climatici che sperimentiamo quotidianamente.

L'inverno 2013-2014 ha però visto il tragitto della corrente a getto ampliarsi e formare giganteschi meandri dai bordi scoscesi, simili a un elettrocardiogramma dal tratto imprevedibile. Inoltre i venti in questa configurazione hanno attraversato la Terra molto più lentamente del solito, fermandosi di tanto in tanto in un certo luogo per settimane e causando periodi straordinariamente lunghi di tempo insolito. Uno studio condotto nel maggio 2014 da Shih-Yu (Simon) Wang della Utah State University ha scoperto che il percorso seguito dalla corrente a getto in quel periodo sul Nord America è stato il più tortuoso mai osservato.

Si è trattato di un'anomalia? Apparentemente no, perché sembra che questo fenomeno si stia ripetendo sempre più spesso. Nel 2010 la Russia ha sofferto dell'ondata di calore più opprimente della storia, che ha ucciso oltre 55.000 persone. Nello stesso periodo il Pakistan è stato sommerso da piogge talmente intense da causare il disastro naturale più costoso da quando se ne tiene traccia. Nel 2011 l'Oklahoma ha sopportato l'estate più calda mai registrata in qualsiasi Stato americano. Nel 2012 gli Stati Uniti hanno sofferto della più vasta ondata di siccità dagli anni trenta.

Secondo quanto riportato in un articolo di aprile 2013 dagli scienziati dell'Institute for Climate Impact Research di Potsdam, in Germania, guidati da Vladimir Petoukhov, durante questi eventi i meandri percorsi dalla corrente a getto hanno mostrato una caratteristica comune. Le onde della corrente, di norma in moto verso est, «si sono fermate e sono state fortemente amplificate», hanno scritto due degli autori in un blog sulla loro ricerca. Talvolta le anse della corrente sono rimaste bloccate nella stessa posizione per giorni, o addirittura mesi. Gli scienziati hanno inoltre mostrato che durante le estati del periodo 2001-2012 forme estreme del percorso della corrente sono state due volte più frequenti che durante le estati dei 22 anni precedenti.

Come cantava Bob Dylan, «Non hai bisogno di un meteorologo per sapere da che parte tira il vento». Sta chiaramente accadendo qualcosa alla corrente a getto, e non è difficile capirne i possibili motivi. Negli ultimi 150 anni le condizioni climatiche di base sono cambiate in modo drammatico, e questo cambiamento inizia ad alterare il comportamento della corrente a getto. I livelli atmosferici di anidride carbonica, il gas che intrappola il calore, per esempio, sono saliti di oltre il 40 per cento, principalmente a causa della combustione di carbone, petrolio e gas naturale. Dal 1900 l'estensione massima dei ghiacci artici nel periodo estivo è calata circa del 50 per cento, influenzando i flussi di calore nell'atmosfera e negli oceani. La quantità di energia solare riflessa dalla superficie terrestre è cambiata in modo rilevante perché abbiamo modificato oltre la metà del paesaggio con campi, pascoli e città. Centrali elet-

Viste dallo space shuttle, nubi ad alta quota si raggruppano lungo la corrente a getto sul Canada orientale. Nell'immagine il nord punta verso il basso, dov'è visibile Cape Breton Island (*al centro*). La velocità dei getti può superare i 300 chilometri all'ora.

triche, mezzi di trasporto, edifici e industrie inquinano eruttando nubi di fuliggine che riflettono e assorbono la luce solare. Un enorme buco nell'ozono perturba la circolazione dei venti negli strati superiori dell'atmosfera sopra l'Antartide.

Gli esseri umani hanno preso a calci il clima e, di conseguenza, la fisica impone che gli schemi fondamentali che determinano le condizioni ambientali terrestri cambino. In effetti, Wang e colleghi hanno dedotto che molto probabilmente il percorso della corrente a getto non avrebbe assunto un aspetto così strano senza l'influenza del riscaldamento globale causato dall'uomo.

Il pericolo è che il clima non è lineare. Modesti livelli di riscaldamento globale possono provocare un cambiamento repentino verso un regime climatico differente. È in atto un intenso dibattito tra i climatologi per stabilire se il clima nella sua interezza, e in particolare la corrente a getto, abbiano superato un punto di svolta, raggiungendo un nuovo stato a lungo termine. Al centro della discussione c'è anche un'ipotesi controversa, sostenuta dai ricercatori di Potsdam e da altri, secondo cui la variazione della corrente a getto nasce soprattutto da quanto avviene nella regione del pianeta che si sta riscaldando più in fretta: l'Artico.

Se davvero la corrente a getto sta entrando in un nuovo regime, per l'umanità non si annuncia nulla di buono. In un articolo pubblicato ad agosto 2014 su «Nature Climate Change», James Screen dell'Università di Exeter e Ian Simmonds dell'Università di Melbourne hanno tentato di individuarne con esattezza i potenziali effetti. Se le onde della corrente a getto «sono amplificate in risposta alla variazione del clima causata dall'uomo, come è stato proposto – scrivono – i nostri risultati suggeriscono che ciò privilegerebbe un aumento della probabilità di ondate di calore nella parte occidentale del Nord America e in Asia centrale, di ondate di freddo polare nelle regioni orientali del Nord America, di periodi di siccità negli Stati centrali del Nord America, in Europa e in Asia centrale, e di piogge estreme in Asia occidentale».

Una nuova normalità che per gli abitanti del Midwest significherebbe siccità estive ancora più terribili. O, per quelli degli Stati orientali, inverni sempre più spesso caratterizzati da serie di bufere di neve simili allo *snowmageddon* (apocalisse di neve) che nel 2010 ha fermato ogni attività a Washington. Il resto del mondo assisterebbe all'aumento del prezzo del cibo come conseguenza delle siccità intense e durature in Nord America, Europa e Asia centrale.

Variazioni naturali

I cambiamenti climatici modificherebbero indirettamente la corrente a getto agendo sulle grandi forze atmosferiche che in sostanza la modellano. L'onnipresente fiume di correnti d'aria circonda il globo in entrambi gli emisferi a una quota che varia da 9 a 14 chilometri, e agisce come una sorta di guida lungo cui viaggiano i sistemi di bassa pressione portatori di precipitazioni. La corrente a getto ha tipicamente due rami: un getto polare che segna il confine tra le masse d'aria fredda vicine ai poli e quelle d'aria calda più vicine all'equatore, e uno subtropicale, meno intenso, che scorre prossimo all'equatore. D'ora in avanti, quando parlo della corrente a getto, mi riferisco al predominante getto polare.

La latitudine del getto polare varia leggermente con le stagioni: in inverno si trova tipicamente sulle regioni centrali degli Stati Uniti e in estate vicino al confine con il Canada. Il flusso è tuttavia caotico, con ampie onde di Rossby sempre presenti. Nell'emisfero settentrionale, quando la corrente a getto si spinge verso il polo sotto forma di un promontorio di alta pressione, celle d'aria calda si spostano da sud verso nord. Dove invece il getto forma un'ansa in direzione dell'equatore, generando una saccatura di bassa pressione, ondate d'aria fredda avanzano da nord verso sud.

La corrente a getto nasce dall'interazione delle tre principali celle convettive di circolazione dell'aria su ciascun emisfero (*si veda il box alle pp. 60-61*). Nonostante le celle contribuiscano a definire la forma della corrente a getto, altre forze dell'atmosfera ne contorcono ulteriormente il percorso. Energia del Sole, forma e posizione dei continenti e delle correnti oceaniche, catene montuose, gas serra e polveri riflettenti fanno risuonare l'atmosfera.

Science Source

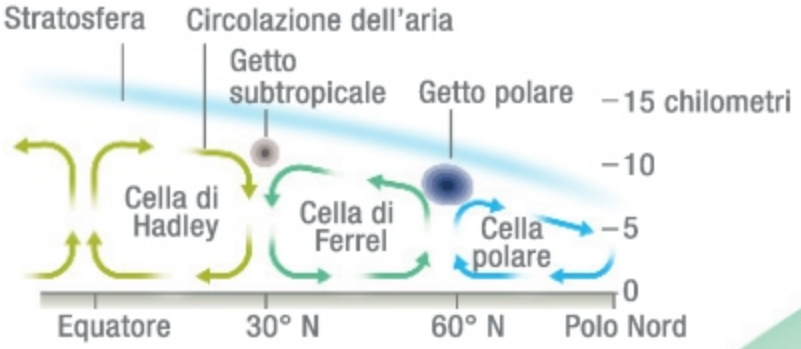
COME FUNZIONA

Una corrente radicale per condizioni climatiche estreme

Due getti di venti ad alta quota soffiano attorno alla Terra in ciascun emisfero. Quando le oscillazioni del getto polare diventano più ampie (*pagina di sinistra*), masse d'aria insolitamente calde o fredde possono sferzare vaste regioni di un continente. Le oscillazioni possono anche bloccarsi in questa configurazione per settimane, provocando siccità, alluvioni, ondate di calore o di freddo straordinario. Due teorie principali spiegano la formazione delle ampie oscillazioni (*pagina di destra*), una guidata dal cambiamento climatico e una collegata al cambiamento climatico oppure alla variabilità naturale.

Formazione delle correnti a getto

All'equatore l'aria riceve più energia solare dei poli, quindi si riscalda, sale fino alla stratosfera e si propaga ai poli. La rotazione terrestre spinge l'aria a formare in ogni emisfero tre celle di circolazione intrecciate. Le correnti a getto nascono lungo i bordi delle celle per eliminare le differenze di pressione.



Ondulazioni, ondate di calore e inverni rigidi

Quando le lievi oscillazioni della corrente a getto polare diventano sempre più ampie (*freccia blu ondulata*) enormi masse di aria calda possono fluire insolitamente a nord, mentre masse d'aria fredda, come il vortice polare invernale, possono spingersi molto a sud. Le oscillazioni impiegano tipicamente da tre a cinque giorni per attraversare gli Stati Uniti, definendo il clima giornaliero.

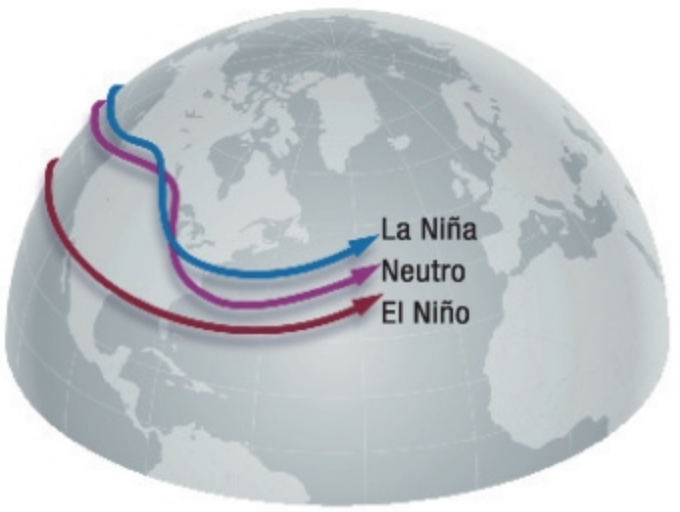
Ramificazioni a lungo termine

Se la corrente a getto polare ha superato un punto di svolta verso un nuovo stato in cui grandi anse del suo percorso sono diventate la norma, gli Stati Uniti potrebbero assistere a più ondate di calore a ovest, ondate di freddo a est e siccità negli Stati centrali.

Perché cambiano le ondulazioni: due possibilità

1 Oscillazioni atmosferiche

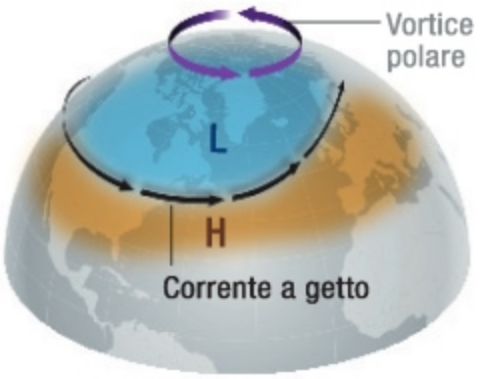
Fenomeni naturali in atmosfera possono alterare il percorso della corrente a getto. I due sospetti principali sono El Niño/Oscillazione meridionale e l'Oscillazione artica.



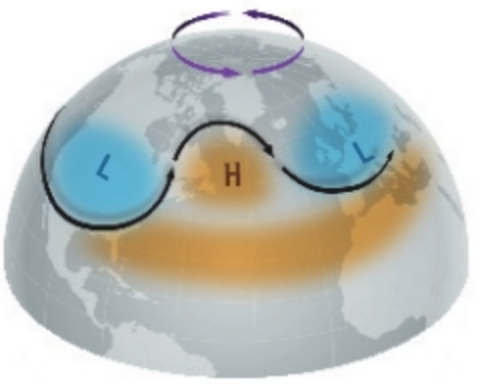
El Niño/Oscillazione meridionale

Questo ciclo della pressione atmosferica tropicale ha due fasi: El Niño trasporta le acque temperate dell'Oceano Pacifico verso ovest, spingendo la corrente a getto verso sud; La Niña trasporta acqua più fredda e sposta il getto verso nord. Ultimamente grandi differenze nelle due fasi, collegate a oscillazioni più ampie della corrente a getto, possono avere origine naturale o essere indotte dal cambiamento climatico.

La fase positiva è collegata a grandi differenze di pressione, che aiutano la corrente a getto a seguire un cammino più dritto, e da un vortice polare molto intenso che mantiene l'aria fredda a nord.



La fase negativa è collegata a piccole differenze di pressione, che indeboliscono la corrente a getto rendendo più probabile la formazione di grandi anse, e indeboliscono il vortice polare, consentendo a masse d'aria fredda di spingersi verso sud.

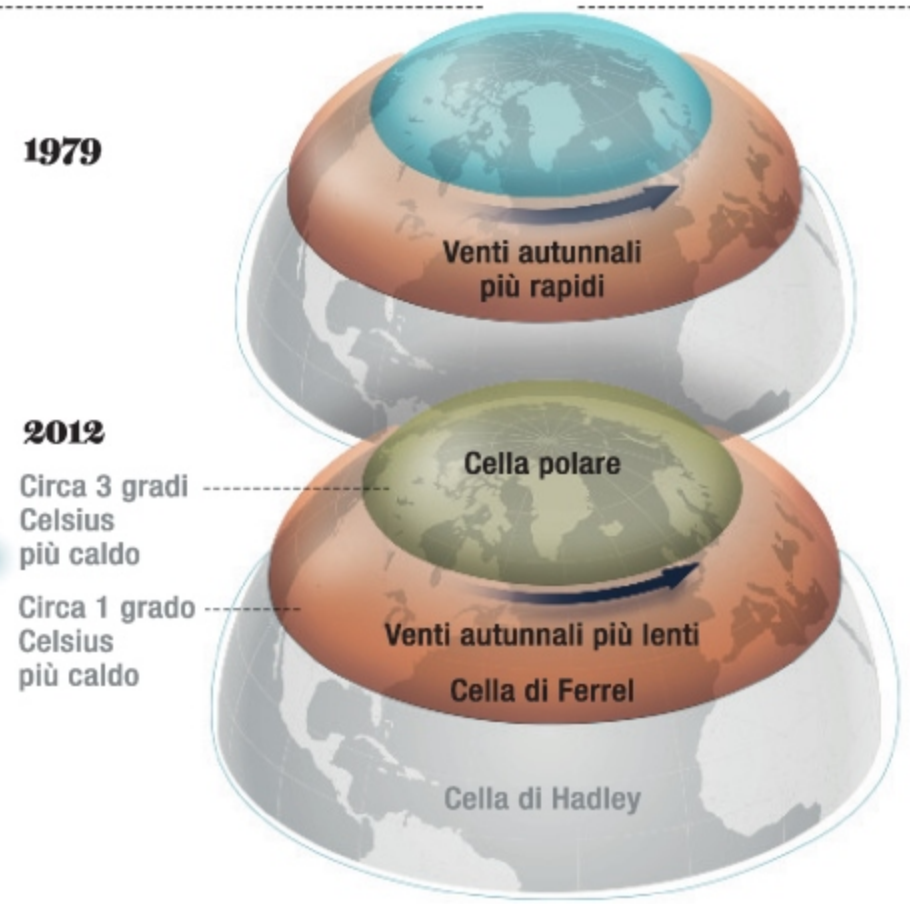


Oscillazione artica

Variazioni settimanali della pressione a livello del mare tra le regioni artiche e le medie latitudini causano questo fenomeno; fattori non ancora del tutto compresi causano l'alternarsi di una fase positiva e una fase negativa.

2 Amplificazione artica

L'Artico si riscalda da due a tre volte più in fretta delle latitudini medie. La scomparsa del ghiaccio marino (*in basso*) è una delle ragioni principali: quantità maggiori d'acqua esposta assorbono in estate energia solare extra che è irradiata in inverno, aumentando la temperatura della cella polare più velocemente di quanto non aumenti quella della cella di Ferrel (*destra*). La diminuzione della differenza di temperatura tra le celle rende più probabili le fasi negative dell'Oscillazione artica e una corrente molto ondulata (*in alto a destra*).



Meno ghiaccio, venti più deboli

Dal 1980 al 2010 l'estensione dei ghiacci marini artici nel periodo estivo è scesa del 40 per cento, e i venti nell'alta atmosfera sopra il Nord America hanno rallentato del 10 per cento (*grafici*). Venti più deboli sono legati alla formazione di meandri ampi e problematici nella corrente a getto.

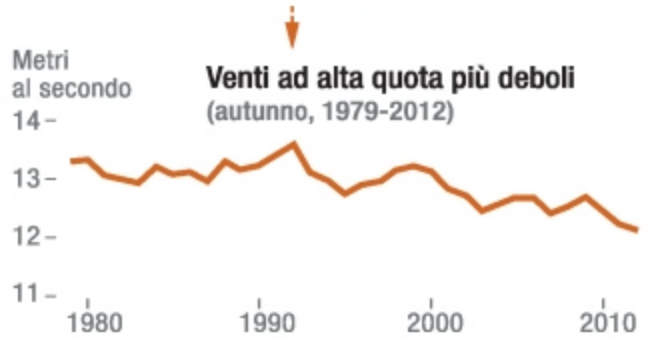


Illustrazione di Juan Velasco, 5W Infographics, Ricerca di Amanda Hobbs; fonte: National Centers for Environmental Prediction ed Earth System Research Laboratory (*mappe in basso a destra, dati ghiaccio marino*), National Snow and Ice Data Center (*mappe in basso a destra, dati vento*), elaborazione dr. Jennifer Francis (*mappe in basso a destra*)

Proprio come una chitarra che suona diversamente in base alla corda pizzicata, variando questi elementi l'atmosfera risuona con toni diversi chiamati teleconnessioni atmosferiche. Si tratta di risonanze naturali che possono modellare la corrente a getto, rendendo più complicato stabilire se il suo recente comportamento sia segno di un cambiamento permanente.

Nell'emisfero settentrionale le due teleconnessioni atmosferiche più importanti sono El Niño/Oscillazione meridionale e l'Oscillazione artica. El Niño/Oscillazione meridionale è una variazione periodica della pressione atmosferica nelle regioni tropicali con un ciclo che dura da tre a otto anni, che spinge porzioni di acqua oceanica più calde della media verso le coste occidentali del Sud America durante la fase El Niño, e più fredde della media durante la fase opposta, La Niña. Di solito la corrente a getto si spinge più a sud sul Pacifico orientale durante la fase El Niño, mentre si rigonfia verso nord nelle stesse zone durante La Niña. L'Oscillazione artica è causata dalle fluttuazioni settimanali di pressione a livello del mare tra Artico e latitudini medio-basse. Se questa differenza di pressione è bassa, i venti della corrente a getto tendono a indebolirsi, consentendo la formazione di ampi anelli: in inverno, una piccola differenza di pressione permette tipicamente all'aria fredda di spingersi molto a sud sulle regioni orientali degli Stati Uniti, in Europa occidentale e in Asia orientale.

Un'idea dalla California

Le teleconnessioni atmosferiche sono concatenate, possono cancellarsi o rinforzarsi a vicenda. Variare le condizioni di base dell'atmosfera in cui si sviluppano potrebbe alterarle al punto da giustificare lo strano comportamento della corrente a getto. Ho pensato a questa possibilità nel 2011, quando una corrente a getto si è bloccata su un percorso estremo, mentre gli effetti di moderazione di La Niña, più deboli del solito, si sono stranamente manifestati solo per parte dell'anno. A quel tempo non erano state pubblicate teorie che spiegassero in dettaglio come la situazione fosse potuta emergere. Ma a dicembre dello stesso anno, a San Francisco, al meeting dell'American Geophysical Union, il maggior congresso mondiale di climatologi, l'esperta di fenomeni atmosferici della Rutgers University Jennifer Francis ha presentato interessanti scoperte sull'evento. A un certo punto ha detto: «Il problema non è se la perdita di ghiacci marini artici stia influenzando la circolazione atmosferica su vasta scala, ma è: come potrebbe non farlo?». Francis ha fatto notare che l'Artico si riscalda due o tre volte più velocemente del resto dell'emisfero nord, fenomeno noto come amplificazione artica, che può perturbare in modo significativo il percorso della corrente a getto nell'emisfero settentrionale.

Questa ipotesi ha senso. Una delle cause principali dell'amplificazione artica durante autunno e inverno è la scomparsa del ghiaccio marino. Negli ultimi anni il Mar Glaciale Artico ha perso immani quantità di ghiaccio a causa dello scioglimento e dell'azione di venti sfavorevoli. Confrontandola con il valore medio tra il 1979 e il 2000, a settembre 2012 era scomparso il 49 per cento della copertura ghiacciata: un'area pari al 43 per cento della superficie totale degli Stati Uniti continentali. Sciogliendosi, i ghiacci marini lasciano scoperte porzioni di mare scuro che assorbono più luce solare rispetto al candido ghiaccio. Le temperature del mare e dell'atmosfera allora aumentano, alimentando un circolo vizioso, perché incrementano il riscaldamento ambientale che provoca la fusione di ulteriori quantità di ghiaccio marino.

In autunno e in inverno le acque esposte alla luce solare liberano il calore accumulato, perturbando per mesi le normali condizioni atmosferiche dell'Artico. Anche in estate si è verificata un'insolita amplificazione causata dalla diminuzione del manto nevoso. Il riscaldamento globale ha anticipato l'arrivo della primavera di circa tre giorni ogni decennio, sciogliendo in anticipo le nevi ed esponendo prima il terreno scuro. Il terreno assorbe calore e si asciuga, anticipando l'inizio della stagione calda continentale.

Insieme ad altri fattori, l'amplificazione artica causata dalla perdita di ghiaccio marino e dalla riduzione del manto nevoso primaverile ha ridotto significativamente la differenza di temperatura tra le medie latitudini dell'emisfero settentrionale e il polo. Questa riduzione potrebbe influire sul comportamento della corrente a getto: se la differenza di temperatura diminuisce, viene trasferita meno energia tra due grandi celle di circolazione atmosferica adiacenti, e i venti della corrente a getto perdono velocità. Francis, insieme a Stephen Vavrus dell'Università del Wisconsin a Madison, ha documentato una riduzione del 14 per cento dei venti che circolano nell'alta atmosfera fin dall'autunno 1979 sul Nord America e sull'Atlantico settentrionale, di concerto con una riduzione della differenza di temperatura.

Un flusso d'aria più lento permette alla corrente a getto di compiere oscillazioni più ampie e tortuose, e Francis ha documentato un aumento ragguardevole dell'ampiezza delle saccature e dei promontori della corrente a getto fin dal 2000, in estate e in inverno. Le deviazioni più ampie tendono a permettere all'aria calda da un lato della corrente a getto di spostarsi molto più verso il polo di quanto non avvenga di solito, con, dall'altra parte, masse d'aria fredda che si spingono molto più a sud. Questo comportamento si è manifestato a gennaio 2014 quando un'ondata di freddo ha colpito gli Stati Uniti orientali mentre la California viveva un caldo e una siccità da record. Modelli matematici mostrano che una corrente a getto più lenta fa avanzare più lentamente le onde di Rossby verso est, permettendo alle condizioni climatiche anomale associate agli ampi meandri del percorso di durare più a lungo in determinate regioni. Questi promontori e saccature potrebbero addirittura essere inclini a fermarsi in certe regioni, formando «blocchi» che arrestano il moto delle onde, proprio come i mulinelli in un fiume che creano zone in cui il flusso d'acqua si arresta.

Disaccordo sul ruolo dell'Artico

Il lavoro di ricerca che collega l'amplificazione artica alle stranezze della corrente a getto ha scatenato una bufera tra i climatologi. Un convegno sull'argomento organizzato dal National Research Council all'Università del Maryland a settembre 2013 ha attratto oltre 50 scienziati esperti di clima, che si sono lanciati in discussioni animate. Nonostante la maggior parte concordi nell'affermare che la corrente a getto sta cambiando, molti dubitano che il periodo relativamente breve di intensa amplificazione artica, circa 15 anni, sia sufficiente a collegare i due fenomeni.

Alcuni esperti mettono in dubbio anche l'ipotesi basata su argomenti legati all'energia. Poiché i voluminosi flussi d'aria della corrente a getto trasportano molta energia, altrettanta dovrebbe essere necessaria per cambiarli. La quantità di energia termica liberata nelle regioni artiche a causa dell'amplificazione artica è un ordine di grandezza inferiore dell'energia nelle variazioni naturali della corrente a getto indotte da El Niño/Oscillazione meridionale studiate finora, osserva Kevin E. Trenberth del National Center for Atmospheric Research. Ad agosto 2014 Trenberth ha pubblicato in rete un articolo su «Nature Climate Change» che mostra come le ampie variazioni di energia avvenute naturalmente negli ultimi anni nell'Oceano Pacifico tropicale a causa di una teleconnessione

atmosferica chiamata Oscillazione pacifica decadale potrebbero aver causato le insolite oscillazioni osservate nella corrente a getto. Ma nell'articolo giunge anche alla conclusione che la natura dei cambiamenti nelle oscillazioni negli ultimi dieci anni potrebbe indicare che la stessa naturale variabilità stia subendo un'alterazione provocata dalle mutazioni climatiche.

Trenberth è uno dei cinque maggiori esperti di clima che a febbraio 2014 hanno pubblicato su «Science» una critica al lavoro di Francis. Secondo loro la ricerca che collega il riscaldamento dell'Artico a ondulazioni eccessive della corrente a getto «merita un ascolto imparziale». Ma hanno anche precisato che non «ritengono convincenti le argomentazioni teoriche sottostanti».

Alcuni scienziati dubitano addirittura che l'ampiezza delle oscillazioni della corrente a getto stia davvero aumentando. In un articolo del 2013 Screen e Simmonds hanno misurato le curvature della corrente a getto usando una definizione differente da quella di Francis, e hanno trovato poche variazioni statisticamente significative, pur avendo notato una debole tendenza generale verso onde di ampiezza maggiore. Eppure i critici hanno proposto poche ipotesi alternative valide a spiegare gli eccessi della corrente. Un'idea è stata pubblicata nell'agosto 2014 nei «Proceedings of the National Academy of Science» da Dim Coumou di Potsdam e colleghi, i quali osservano che il calo della differenza di temperatura tra medie latitudini e poli potrebbe aver provocato, da solo, l'amplificazione e il conseguente blocco della corrente a getto, almeno in estate.

Se la corrente a getto diventerà sempre più ondulata, gli eventi meteo estremi aumenteranno di intensità, seminando morte e distruzione

Non possiamo attendere oltre

Nonostante gli scienziati possano non essere ancora d'accordo sulle cause del fenomeno, i dati sul clima sono rivelatori. Per esempio, alcuni degli eventi meteo più iconici e distruttivi della storia degli Stati Uniti – la super epidemia di tornado del 1974, il caldo e la siccità legate alla *dust bowl* del 1936 e la grande alluvione del Mississippi del 1927 – sono stati eguagliati o superati in intensità solo nel 2011 e nel 2012. Il comportamento recente della corrente a getto potrebbe davvero indicare che abbiamo varcato la soglia verso condizioni climatiche differenti, più minacciose e caratterizzate da eventi meteo più energetici.

Mentre il pianeta continua a scaldarsi, temperature maggiori condurranno a ondate di calore e siccità più intense nelle aree in cui si formano promontori di alta pressione lungo il percorso della corrente a getto. Nei punti in cui la corrente si piega verso l'equatore formando saccature di bassa pressione si assisterà a temporali più forti con rovesci più intensi, dato che l'aumento dell'evaporazione oceanica aumenta l'umidità dell'atmosfera. Se la corrente a getto continuerà a compiere ampie oscillazioni che si spostano lentamente, questi eventi meteorologici estremi guadagneranno ancora più intensità e dureranno più a lungo, moltiplicando il loro potenziale di morte e distruzione. Se le teorie presentate da Francis e colleghi sono corrette, tornare indietro non è possibile, a meno di non trovare un modo per aumentare la quantità di ghiaccio marino artico. Poiché le quantità di anidride carbonica in atmosfera continuano ad aumentare dello 0,5 per cento ogni anno, nessuno scienziato che studi i ghiacci artici prospetta un recupero nel lungo periodo.

La siccità è la minaccia peggiore, perché colpisce quello di cui abbiamo più bisogno per sopravvivere: acqua e cibo. Se una corrente a getto dal percorso molto amplificato, con strani promontori di alta pressione, dovesse bloccarsi per un'intera estate sulle regioni produttrici di cereali della Russia e degli Stati Uniti, verrebbero a mancare le precipitazioni necessarie alla buona riuscita del raccolto. La conseguente siccità potrebbe causare gravi aumenti del costo del cibo, carestia diffusa e disordini violenti. Durante le forti ondate di calore e siccità che hanno colpito la Russia nel 2010, un massiccio e impenetrabile promontorio di alta pressione si era installato sul paese e aveva deviato verso il Pakistan i sistemi a bassa pressione che solitamente portano la pioggia ai raccolti russi, provocando nel paese asiatico allagamenti catastrofici. Siccità e ondata di calore hanno rappresentato la peggior catastrofe naturale della storia russa: hanno costretto il paese a tagliare le esportazioni di grano, facendo crescere il prezzo del cereale sul mercato mondiale e aiutando a infiammare la «primavera araba», la serie di disordini che hanno condotto alla caduta di diversi governi nel 2011.

Il mondo non può permettersi di attendere senza agire fino a quando gli scienziati non abbiano capito come e perché il clima sta cambiando. Secondo l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dobbiamo agire subito in modo efficace e a livello globale per mantenere il riscaldamento al di sotto della pericolosa soglia dei 2 gradi Celsius. La diffusione di fonti energetiche come solare, eolico e nucleare, a zero emissioni di anidride carbonica, insieme a nuove tecnologie che possano catturare e immagazzinare carbonio, deve almeno triplicare entro il 2050, e le emissioni di gas serra devono diminuire dal 40 al 70 per cento rispetto ai livelli del 2010. Il cambiamento potrebbe rivelarsi accessibile, ha rivelato l'IPCC, con un abbattimento dell'economia globale appena dello 0,06 per cento annuo. Ma se aspettiamo fino al 2030 le azioni da intraprendere saranno molto più costose, ed evitare la soglia potrebbe diventare impossibile.

Il 2030 è anche l'anno in cui, secondo diversi esperti climatologi mondiali, il ghiaccio marino artico estivo sostanzialmente scomparirà. Se la colpa delle stranezze della corrente a getto va davvero cercata nei cambiamenti subiti dall'Artico, perdere il restante 50 per cento dei ghiacci artici tra qui e il 2030 non porterà che a ulteriori bizzarrie. Se invece l'Artico non c'entra nulla, dobbiamo comunque preoccuparci perché significa che i cambiamenti della corrente a getto sono innescati da un meccanismo sconosciuto, e non abbiamo idea di come la corrente possa rispondere ai continui cambiamenti climatici. Ecco quindi la mia previsione per i prossimi 15 anni: aspettatevi qualcosa senza precedenti. ■

PER APPROFONDIRE

Linkage between Arctic Warming and Mid-Latitude Weather Patterns: Summary of a Workshop. Thomas K. e altri, National Academies Press, 2014. **www.nap.edu/catalog.php?record_id=18727.**

WunderBlog, di Jeff Masters: **www.wunderground.com/blog/JeffMasters/show.html.**

U.S. National Climate Assessment: **http://nca2014.globalchange.gov.**

Gli inverni del nostro scontento. Greene C.H., in «Le Scienze» n. 534, febbraio 2013.

MEDICINA

IL DOLORE CHE NON PASSA

Nuove conoscenze sulle cause che scatenano
il dolore cronico producono idee originali per contrastarlo

di Stephani Sutherland

Fotografia di Gerald Slota

IN BREVE

Nei soli Stati Uniti il dolore cronico riguarda un numero di persone più grande di quello di chi soffre di cancro, malattie cardiache e diabete insieme, e ha anche un costo più elevato.

Oppioidi e altri farmaci sono poco efficaci nel dare sollievo a gran parte delle condizioni di dolore cronico e sono fonte di seri rischi. La scoperta di vie molecolari specifiche del dolore ha portato nuovi bersagli per lo sviluppo di farmaci.

Fra gli antidolorifici di nuova generazione in fase di sperimentazione ci sono anche sostanze che si trovano in veleni animali.

Stephani Sutherland è una neuroscienziata e scrive di scienza.

"Mi raccomando, fermati dal fruttivendolo, non al *fast food*». Così raccomandava Jama Bond al marito chiamandolo dal cellulare, mentre l'uomo cercava di recuperare un po' di ghiaccio, una sera del 2012. «I loro cubetti si sciolgono troppo in fretta». Bond, che all'epoca aveva 38 anni ed era quasi al nono mese di gravidanza, aveva bisogno di sacchetti di ghiaccio per mantenere fredda l'acqua della bacinella per i piedi, che erano rossi, gonfi e doloranti. Aveva imparato che, per evitare danni alla pelle, doveva avvolgere i piedi con borse di nylon, prima di immergerli nell'acqua ghiacciata.

Alcuni mesi prima Bond era una giovane donna, sana, con un impiego amministrativo in un'azienda che installa pannelli fotovoltaici e con una vita più o meno normale. Ora a mala pena lasciava il conforto del pediluvio, tranne per la doccia, «che era una tortura».

Bond, che vive a Santa Rosa, in California, soffriva di una malattia chiamata eritromelalgia (EM) – dal greco «dolore agli arti arrossati» – in cui mani o piedi sviluppavano bruciore insopportabile, diventando particolarmente sensibili addirittura a temperature tiepide o a una pressione leggera. Per la maggior parte dei pazienti, come Bond, questa condizione non ha spiegazioni (non ha alcuno collegamento conosciuto con la gravidanza). Più in generale, il dolore cronico nella miriade di forme che può assumere è sorprendentemente comune e spesso ha origini ingannevoli.

Si stima che negli Stati Uniti 100 milioni di persone soffrano di dolore cronico, più spesso sotto forma di mal di schiena, differenti tipi di mal di testa o artrite. Il dolore cronico colpisce più statunitensi di quanto facciano diabete, cancro e malattie cardiache insieme, e costa anche di più: 635 miliardi di dollari all'anno in cure mediche e giornate di lavoro perse, secondo un'analisi del 2012. Il prezzo da pagare in termini di sofferenza è impossibile da calcolare. Le persone colpite da dolore cronico hanno un maggior rischio di infermità, depressione, disturbi dell'umore e del sonno, dipendenza da droghe e alcool e suicidio. Linda Porter, consulente sulle politiche sanitarie per il dolore presso il National Institute of Neurological Disorders and Stroke e direttore del Pain Policy Office dei National Institutes of Health di Bethesda, definisce il dolore cronico «un enorme problema di salute pubblica che non è adeguatamente riconosciuto né affrontato».

Il dolore esiste per una ragione: è un allarme interno contro i danni all'organismo, che ci costringe a ritirare subito una mano dal forno caldo prima che si ustioni o a smettere di camminare su una gamba rotta. A volte, però, il dolore dura molto a lungo dopo che la minaccia se n'è andata. Sebbene il dolore cronico possa emergere inspiegabilmente, in generale può essere diviso in due categorie: infiammatorio, come quello causato per esempio dall'osteoartrite, e neuropatico, che di solito emerge da un danno nervoso causato da lesione, malattia o da un altro genere di trauma.

Il dolore cronico è difficile da curare e quello neuropatico rappresenta una sfida impegnativa, anche perché farmaci antinfiammatori comuni come ibuprofene e naprossene a mala pena lo scalfiscono. Nel caso di dolore acuto di breve durata, morfina e oppioidi rappresentano lo standard di riferimento, ma hanno effetti collaterali che vanno da una banale costipazione e sonnolenza a una più grave, e potenzialmente mortale, inibizione della respirazione. Le persone che ne fanno uso per periodi prolungati sviluppano tolleranza verso i principi attivi e necessitano di dosi sempre più grandi, aumentando i rischi. Anche dipendenza e abuso sono problemi seri con gli oppioidi: negli Stati Uniti muoiono più persone per overdose da questi analgesici rispetto a quelle che muoiono per overdose da cocaina ed eroina. Altri farmaci usati attualmente per curare il dolore cronico ne includono alcuni prescritti originariamente per curare crisi epilettiche e depressione, e anche questi hanno limiti. Nonostante i possibili rischi per il bambino che aveva in grembo, Bond riceveva un cocktail di oppioidi, anticonvulsivi e antidepressivi che la aiutassero a dormire, riducendo così il suo livello di stress pericolosamente alto.

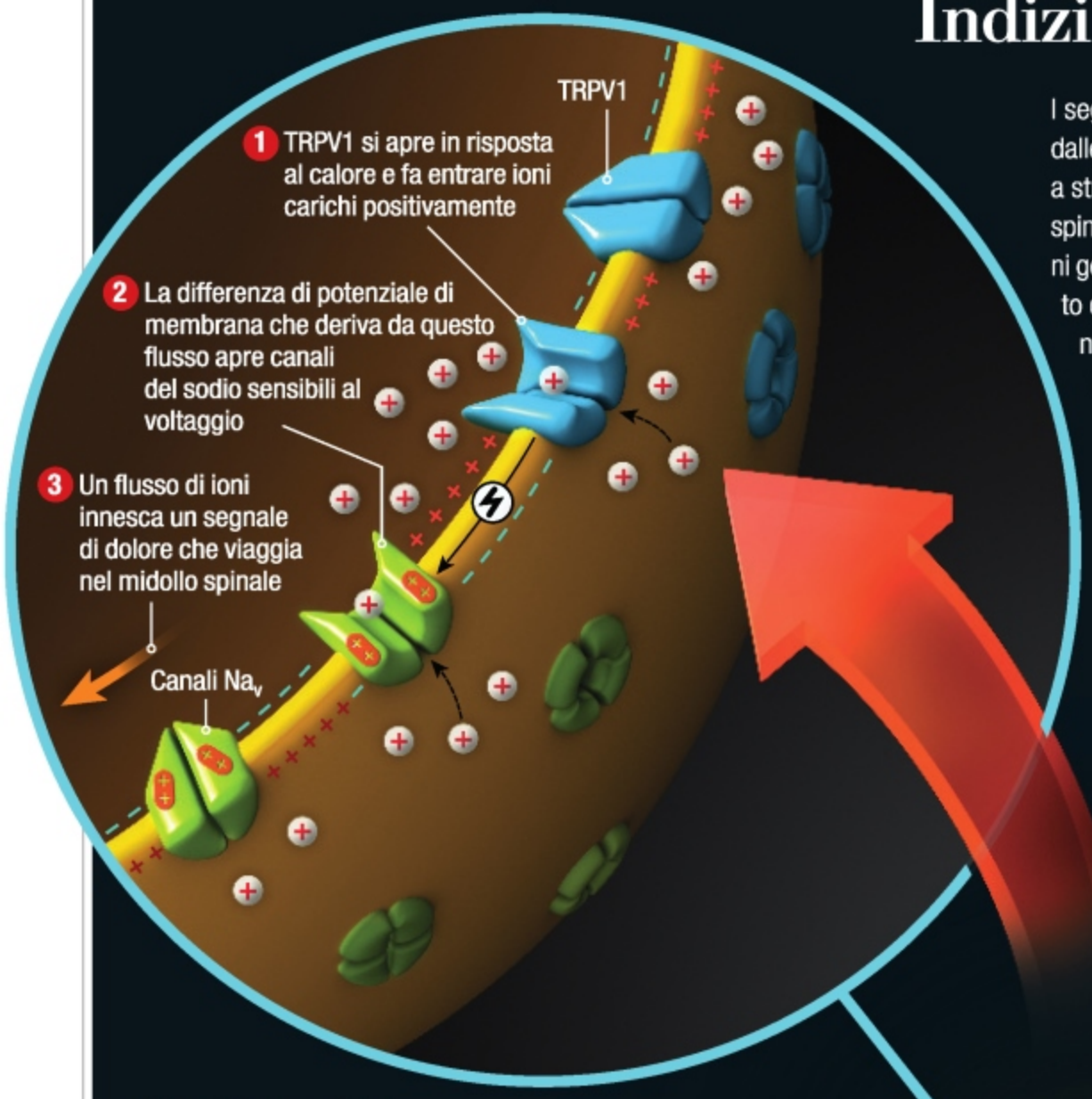
Neppure gli sforzi più imponenti hanno ottenuto farmaci più sicuri ed efficaci, ma qualcosa inizia a cambiare. Recenti scoperte hanno aperto la strada a nuove promettenti possibilità per lo sviluppo di farmaci. «Oggi i ricercatori fanno molti progressi, concentrandosi sulle vie di segnalazione molecolare del dolore. Siamo ottimisti», dice Porter.

Una corsa a staffetta

Per capire questi nuovi sforzi mirati a controllare il dolore cronico, è utile sapere come emerge questa sensazione di sofferenza. Il dolore inizia sotto forma di stimolo rilevato da cellule nervose specializzate chiamate nocicettori, i cui prolungamenti si estendono sull'intera superficie del corpo, dentro e fuori. Stimoli che

Indizi per smorzare il dolore

I segnali di dolore generati dal cuore o da altri stimoli viaggiano dalle terminazioni nervose della pelle o di altre parti del corpo fino a strutture chiamate gangli della radice dorsale, vicino al midollo spinale, e poi fino al midollo spinale e al cervello. Tuttavia, mutazioni genetiche o un danno ai nervi possono alterare il comportamento di molecole fondamentali lungo il percorso, fra cui i canali ionici, in modi che rendono cronico il dolore. Nella speranza di alleviare la sofferenza, i ricercatori ora puntano a queste molecole chiave usando approcci diversi.



Canali iperattivi

Nelle membrane delle terminazioni nervose che rilevano stimoli dolorosi ci sono molecole chiamate canali ionici, che aprono e chiudono un poro centrale in risposta a stimoli. Un canale chiamato TRPV1, per esempio, rileva il calore. Quando si apre, ioni carichi positivamente (principalmente ioni sodio) entrano rapidamente aumentando il voltaggio della membrana. Come risposta, canali del sodio sensibili al voltaggio (Na_vs) si aprono e innescano un segnale di dolore che viaggia verso il midollo spinale. Anomalie nei Na_vs o in TRPV1 possono provocare un flusso eccessivo di segnali. Alcune sostanze attualmente in fase di studio potrebbero diminuire l'attività del canale, e dunque bloccare l'eccesso di segnali.

Cortocircuiti

Alcuni nervi che rilevano segnali sensoriali si specializzano nella trasmissione del dolore, altri trasmettono sensazioni tattili. Il dialogo incrociato fra queste due vie è regolato da cellule nel midollo spinale chiamate interneuroni (*in blu*).Questa regolazione è spesso stravolta in persone che soffrono di dolore cronico, che quindi provano allodinia, dolore in seguito uno stimolo innocuo come un tocco. Le ricerche mostrano che questo disturbo può emergere dopo la lesione di un nervo, quando cellule del sistema immunitario conosciute come microglia liberano segnali chimici che nei neuroni del midollo spinale provocano la perdita di una molecola essenziale per una normale segnalazione. I ricercatori stanno lavorando alla riparazione di questo circuito.

Illustrazione di Emily Cooper

potrebbero danneggiare il corpo – temperature troppo elevate o troppo basse, forze meccaniche o un'intera gamma di sostanze – attivano queste terminazioni nervose. A quel punto le terminazioni inviano segnali che si propagano verso i corpi cellulari dei nocicettori, che si trovano in strutture chiamate gangli delle radici dorsali, subito all'esterno del midollo spinale. Da qui, i nocicettori ritrasmettono l'informazione relativa alla minaccia ai neuroni nel midollo spinale. Questi, a loro volta, innescano l'attività dell'estesa rete cerebrale del dolore, che include aree coinvolte nel pensiero e nelle emozioni (elemento che spiega perché placebo e distrazioni possono a volte alleviare il dolore).

Come tutti i segnali nervosi, i messaggi del dolore viaggiano veloci da un'estremità di un neurone a un altro, tramite un evento di natura elettrica chiamato potenziale d'azione, generato dal flusso di ioni – atomi di sodio e potassio dotati di carica elettrica – che attraversano la membrana di una cellula. Questi ioni attraversano minuscoli pori nella membrana chiamati canali ionici, che sono formati da proteine che cambiano forma in una configurazione chiusa o in una configurazione aperta. In corrispondenza delle terminazioni dei nocicettori, canali ionici specializzati rilevano possibili minacce, come calore o molecole liberate da cellule vicine danneggiate. Quando questi canali si aprono, un flusso di ioni positivi entra nella cellula, cambiando leggermente il potenziale di equilibrio attraverso la membrana. Questo flusso, a sua volta, stimola altri canali ionici sensibili a specifici voltaggi. Quando un numero sufficiente di questi canali ionici sensibili al voltaggio si apre, il flusso ionico risultante innesca un potenziale d'azione che percorre tutta la lunghezza del neurone, in modo simile al pubblico di uno stadio che fa la *ola*. Il potenziale d'azione culmina nel rilascio di un neurotrasmettitore nel midollo spinale: un messaggio chimico che trasmette informazioni ai neuroni vicini.

Buona parte di quello che abbiamo imparato sul dolore negli ultimi vent'anni è centrato sui canali ionici: come rilevano segnali quali calore o danni a tessuti, quali sono necessari per la segnalazione del dolore, invece di giocare un ruolo di sostegno; e, forse, la questione più impellente: a quali canali mirare per silenziare in modo sicuro segnali di dolore indesiderati.

Ricercatori e case farmaceutiche hanno capito da molto tempo che il blocco dei canali del sodio a livello delle terminazioni nervose allevia il dolore: gli anestetici locali lidocaina e novocaina, per esempio, intasano i canali del sodio, la cui azione è di breve durata, provocando insensibilità non solo al dolore ma anche a tutte le sensazioni, nelle zone in cui sono applicati. Nell'essere umano e in altri mammiferi sono stati trovati nove canali del sodiosensibili al voltaggio, ciascuno dei quali si apre in risposta a un voltaggio leggermente diverso. Se bloccassimo tutti questi canali, otterremmo effetti devastanti, perché i canali del sodio si trovano in tutte le cellule nervose dell'organismo e in altri tessuti, compresi cervello e cuore. Un blocco indiscriminato potrebbe interferire con i segnali che generano battito cardiaco, respiro e movimento. Per anni, dunque, gli scienziati hanno cercato un Santo Graal: canali del sodio la cui attività si limiti alle cellule che percepiscono il dolore.

Alla fine degli anni novanta i ricercatori si sono avvicinati a questo bersaglio con la scoperta di tre canali del sodio sensibili al voltaggio presenti solo nella rete nervosa periferica (contrariamente a quello che si osserva nel midollo spinale e nel cervello), dove in genere iniziano i segnali del dolore. Chiamati $Na_v1.7$, $Na_v1.8$ e $Na_v1.9$, questi tre canali sono relegati soprattutto nei nocicettori e in neuroni coinvolti nelle sensazioni («Na» sta per sodio, e «V» sta per voltaggio, il numero indica la loro posizione nella famiglia dei nove canali conosciuti). Dopo aver identificato i geni che codificano per questi canali, i ricercatori ne hanno manipolato l'attività in modelli animali. Nei dieci anni seguenti, test di laboratorio hanno confermato che almeno nel topo il silenziamento del canale sensoriale Na_v s può alleviare il dolore neuropatico.

Verso il 2000, i canali Na_v erano considerati un bersaglio promettente per lo sviluppo di farmaci, anche se le aziende farmaceutiche avevano bisogno di prove che andassero oltre gli studi sugli animali per giustificare un investimento così importante. Questi dati sono stati poi pubblicati in quattro articoli chiave, nei quali il canale $Na_v1.7$ è stato collegato al dolore negli esseri umani. Nel 2004 un gruppo di ricercatori di Pechino ha scoperto mutazioni nel gene che codifica per il canale $Na_v1.7$ in due famiglie cinesi con eritromelalgia ereditaria, la malattia sviluppata spontaneamente da Bond in gravidanza. Nel 2005 Stephen Waxman e Sulayman Dib-Hajj, entrambi alla Yale School of Medicine e al Veterans Affairs Connecticut Health Care System, hanno confermato che queste mutazioni portano a iperattività del canale $Na_v1.7$ che può causare dolore. Subito dopo, John Wood, dello University College di Londra, e colleghi hanno affermato che anche un'altra condizione - la sindrome da dolore parossistico estremo che causa dolore a retto, occhi e mandibola – emerge da un canale $Na_v1.7$ iperattivo mutante. Nel 2006 Geoff Woods e James Cox, all'epoca all'Università di Cambridge, hanno dimostrato che

Per anni gli scienziati hanno cercato senza successo la soluzione definitiva al dolore lavorando su canali cellulari del sodio, oggi fanno progressi concentrandosi sulle vie di segnalazione del dolore

le mutazioni nel canale $Na_v1.7$ che ne eliminano la funzione eliminavano anche qualunque sensazione dolorosa, determinando una condizione rara e pericolosa che spesso a porta alla morte, a causa di ferite non sentite. Insieme queste scoperte in condizioni genetiche insolite hanno confermato l'importanza di $Na_v1.7$ nella sensazione umana di dolore.

Waxman studia malattie genetiche rare perché, spiega, possono essere utili come «indicatori per vie patologiche che potrebbero essere più comuni». Nel 2012, insieme ad alcuni collaboratori olandesi, Waxman ha cambiato obiettivo, dedicandosi a una malattia più comune. Il termine polineuropatia delle piccole fibre è una definizione piuttosto ampia che descrive un danno a nervi periferici, spesso a livello di mani o di piedi, che percepiscono il dolore. Metà dei pazienti con diagnosi per questa malattia ha una causa identificabile di danno nervoso, come il diabete; nell'altra metà però le cause del dolore rimangono un mistero. Waxman e i suoi colleghi olandesi hanno esaminato il DNA di pazienti i cui casi non avevano spiegazione e hanno scoperto mutazioni nei geni che codificano per $Na_v1.7$ quasi nel 30 per cento dei soggetti, mutazioni in $Na_v1.8$ nel 9 per cento e mutazioni in $Na_v1.9$ in un

SCOPERTE

Perché io?

Una grande varietà di fattori spiega perché alcune persone sono più vulnerabili di altre nei confronti del dolore cronico. Prendete dieci persone che soffrono dello stesso dolore alla schiena causato da un incidente automobilistico. Tre di queste avranno la sfortuna di sviluppare un dolore cronico come risultato dell'incidente. Oppure prendete dieci persone con diabete: circa la metà svilupperà un danno nervoso, o neuropatia, ma la lesione provocherà un dolore costante solo in tre di esse. Quali sono i fattori rendono alcune persone vulnerabili e altre resilienti? Questa domanda non ha ancora trovato una risposta completa, tuttavia i ricercatori puntano a tre elementi principali che sembrano agire in concerto.

Cablaggio

I geni aiutano a determinare sensibilità e tolleranza di un individuo nei confronti del dolore, e alcuni aumentano le probabilità che vi sia un'insolita suscettibilità dei confronti del dolore cronico. Uno dei principali fattori genetici è il genere: le donne hanno una probabilità molto più elevata rispetto agli uomini di sviluppare dolore cronico nel corso della vita.

Esperienze

Stress, traumi e abusi – sia fisici sia emotivi – possono aumentare il rischio. Alcuni studi suggeriscono che queste esperienze possano causare cambiamenti di lungo periodo nell'attività genica, accendendo e spegnendo geni in modi che influiscono sui circuiti del dolore. Inoltre, il rischio di sviluppare dolore cronico aumenta con l'età, non solo a causa del logoramento dell'organismo ma probabilmente anche perché la capacità del corpo di riparare i danni – inclusi i danni nervosi – diminuisce via via che invecchiamo.

Personalità

Alcuni tratti della personalità incrementano il rischio. Le persone pessimiste, quelle apprensive e quelle catastrofiste hanno maggiori probabilità di soffrire di dolore. I circuiti del cervello coinvolti nella motivazione e nella gratificazione sembrano influire anche sulla vulnerabilità al dolore.

altro 3 per cento. Il gruppo di Waxman ha anche scoperto che le persone con dolore cronico causato da una lesione nervosa hanno molti più canali $Na_v1.7$ nei nervi danneggiati.

Queste scoperte hanno spinto le aziende farmaceutiche a studiare i canali del sodio sensoriali-specifici. Da anni Pfizer sviluppa farmaci il cui bersaglio sono i canali $Na_v1.7$ e $Na_v1.8$, e sebbene sia presto per affermare quando potrebbe essere disponibile un nuovo antidolorifico, molte nuove sostanze sono in fase di sperimentazione sui pazienti, come riferisce Neil Castle di Neusentis, l'unità di ricerca di Pfizer su dolore e disturbi sensoriali con sede a Durham, in North Carolina. A differenza di farmaci datati come la lidocaina, queste nuove molecole non mirano al poro principale del canale del sodio, una struttura che è quasi identica fra i diversi sottotipi di canale. Agiscono invece su una regione del canale sensibile al voltaggio e diversa da un canale all'altro, dando a queste molecole maggiore specificità, e presumibilmente, rendendole più sicure. Nel 2013 il gruppo di Castle ha annunciato la scoperta di una sostanza che colpisce selettivamente al canale sensibile al voltaggio $Na_v1.7$. Queste molecole, dice Castle, «mostrano un'elevata selettività e quindi non interferiscono con la funzione cardiaca o muscolare», o almeno questo non avvenuto nei primi test.

Nel frattempo anche un gruppo di ricerca alla Duke University punta al canale $Na_v1.7$ sensibile al voltaggio, ma lo fa servendosi di un anticorpo, una molecola che deriva dal sistema immunitario. Secondo uno studio pubblicato nel giugno scorso, in topi di laboratorio l'anticorpo allevia il dolore infiammatorio e quello neuropatico; inoltre allevia il prurito, triplicando il valore di questo approccio sul fronte del sollievo al dolore. Anche altri ricercatori che studiano la capacità di certi veleni di agire sul canale del sodio $Na_v1.7$ hanno ottenuto un certo successo (*si veda il box a p. 70*).

Aumentare la temperatura

I canali del sodio non sono l'unico bersaglio finito nel mirino dei ricercatori. Un altro canale ionico chiamato TRPV1 (da *transient receptor potential channel* V1) è noto per essere attivato da temperature elevate e dalla capsaicina – la molecola che dà il sapore piccante ai peperoncini - e si trova principalmente nelle cellule sensibili al dolore. Da quando David Julius e colleghi dell'Università della California a San Francisco hanno scoperto il gene che codifica per TRPV1, era il 1997, gli scienziati hanno cercato molecole che potrebbero silenziare segnali dolorosi, grazie alla chiusura di questo canale.

«Il TRPV1 è stato un bersaglio assai promettente ma anche assai sfuggente per lungo tempo», afferma Porter dei National Institutes of Health. I primi bloccanti che ne hanno impedito l'attività sono stati accompagnati da effetti collaterali ingestibili, come per esempio eccessivo aumento della temperatura corporea e insensibilità al calore, un effetto che poteva causare ustioni. Più di recente è emerso che il canale, sensibile anche ad acido, tossine di ragno e sostanze che promuovono l'infiammazione, è un complesso integratore di segnali sensoriali. «Il farmaco migliore non turberebbe la sensibilità al calore caratteristica di questo canale», spiega Julius. Si limiterebbe a placare un canale iperattivo.

Nel dicembre 2013 il gruppo di ricercatori guidato da Julius ha fatto un passo avanti quando ha pubblicato la prima immagine ad alta risoluzione della struttura del TRPV1 in diversi stati. Questa informazione dovrebbe aiutare i ricercatori a trovare un modo per bloccare il canale solo quando assume una forma che causa dolore.

Dolore frainteso

La maggior parte delle persone che soffre di dolore neuropatico sperimenta tre delle sue caratteristiche distintive: ipersensibilità a stimoli dolorosi; dolore spontaneo che colpisce spuntando dal nulla; e allodinia, una condizione che rende doloroso un tocco innocuo (proprio a causa dell'allodinia Bell viveva come una tortura una semplice doccia). Se da un lato le ricerche sui canali ionici hanno aiutato a spiegare l'ipersensibilità, un altro filone di studi ha chiarito come emerge l'allodinia. Di norma i segnali dolorosi e i segnali che derivano da una sensazione tattile non dolorosa viaggiano lungo vie separate, dai nervi presenti nella pelle fino al midollo spinale, e poi su fino al cervello. Nel caso dell'allodinia, però, i segnali si incrociano nel midollo spinale: i neuroni sensibili al tatto attivano la via del dolore.

I motivi per cui le cose vanno nel modo sbagliato sono stati scoperti principalmente da ricercatori in Giappone e da due gruppi in Canada, il primo guidato da Yves De Koninck, del Quebec Mental Health University Institute, e l'altro guidato Michael Sal-

Estrarre il pungiglione dal dolore

Molecole di veleno potrebbero fornire alternative a farmaci oppiacei che danno assuefazione

di Mark Peplow

Analgesico. Il veleno della scolopendra cinese dalla testa rossa contiene un principio attivo che può intorpidire i nervi senza danneggiare il resto del corpo.

Quando Glenn King munge i suoi millepiedi, non cerca principi nutritivi. Preleva il loro veleno, un compito tutt'altro che semplice. «Immobilizziamo i millepiedi con fasce elastiche, applichiamo un paio di pinze elettriche alle loro piccole pinze, diamo corrente e i millepiedi buttano fuori il veleno», dice King, biochimico dell'Università del Queensland, in Australia.

In quei pochi microlitri di fluido potrebbe esserci la chiave per una nuova serie di farmaci antidolorifici. I veleni sono depositi naturali di molecole che intorpidiscono i nervi, e con 400 diversi tipi di veleno nel suo laboratorio King è in prima linea negli sforzi mirati a identificare antidolorifici nei pungiglioni di millepiedi, ragni, lumache e altre bestie velenose.

Grandi case farmaceutiche hanno cercato in tutti i modi di sintetizzare farmaci alternativi agli antidolorifici che danno assuefazione, come la morfina, ma hanno avuto problemi nell'ottenere molecole in grado di dirigersi sugli specifici nervi che devono essere colpiti. I veleni però si sono evoluti naturalmente fino a contenere molecole con questo tipo di specificità. L'uso ristretto di queste molecole può rendere insensibili i nervi senza danneggiare il resto del corpo. I bersagli a cui stanno puntando molti ricercatori sono chiamati canali ionici del sodio voltaggio-dipendenti e sono comuni nelle cellule nervose che rilevano il dolore. Bloccare un particolare tipo di canale chiamato $Na_v1.7$ impedisce alla cellula di trasmettere un messaggio di dolore ad altre parti del corpo, come è già stato discusso in questo articolo.

Certe componenti del veleno hanno proprio l'esatta forma e attività chimica necessarie a legarsi a una parte del canale chiamata sensore di voltaggio, e questo legame provoca la chiusura del canale. Lo scorso anno King ha identificato una molecola di veleno chiamata m-SLPTX-Ssm6a, che sembrava uno degli inibitori più selettivi mai osservati per il canale ionico $Na_v1.7$. King ha trovato questa molecola nel veleno della scolopendra dalla testa rossa (*Scolopendra subspinipes mutilans*), un centopiedi comune in Cina, che può crescere fino a 20 centimetri di lunghezza e ha un paio di robuste pinze simili a tenaglie. «Se ti afferrano fanno molto male», avverte King. Tuttavia, la molecola che costituisce il principio attivo del veleno di questa scolopendra aveva un effetto opposto in topi con ferite: in base ai risultati di esperimenti, bloccava il dolore meglio della morfina, ma non aveva effetti collaterali indesiderati su pressione sanguigna, battito cardiaco, funzionalità motoria. Questo indicava che il principio attivo non deprimeva il sistema nervoso centrale, come invece avviene con un oppioide come la morfina.

Il gruppo di ricerca di King ha prodotto una versione sintetica di questa molecola per vedere se sia possibile produrla sotto forma di farmaco. Purtroppo i ricercatori hanno scoperto che la versione sintetica non funzionava altrettanto bene come quella della scolopendra. King ritiene che la preparazione originaria di m-SLPTX-Ssm6a che aveva prodotto con i colleghi contenesse, in effetti, tracce di un altro componente attivo. Attualmente il ricercatore è impegnato a effettuare un'ulteriore sessione di prelievi di principi attivi dal centopiedi, nella speranza di trovare il misterioso ingrediente. Anche il veleno di certi serpenti è fonte di composti che bloccano selettivamente il canale. Anne Baron, farmacologa del francese Institut de Pharmacologie Moléculaire et Cellulaire, ha isolato due molecole analgesiche dal veleno del mamba nero (*Dendroaspis polylepis*). «Siamo quasi pronti per un trial clinico», dice Baron. «Abbiamo effettuato molti test su modelli sperimentali animali, roditori in particolare, per verificarne la tossicità». Le mambalgine, così sono chiamate queste molecole, regolano un particolare gruppo di canali ionici sensibili all'acido nelle cellule nervose periferiche, canali che, come quelli del sodio, aiutano le cellule a inviare segnali di dolore. Le mambalgine non hanno effetto sulla maggior parte degli altri canali ionici, caratteristica che potrebbe spiegare perché i topi a cui sono state iniettate queste sostanze non hanno mostrato apparenti effetti collaterali.

Riuscire a colpire con precisione le cellule nervose non è l'unico obiettivo delle ricerche sul veleno, afferma David Craik, biochimico all'Università del Queensland, in Australia. Se vogliamo che le molecole di veleno possano essere ingoiate sotto forma di pillole antidolorifiche, devono resistere alla degradazione da parte del sistema digestivo. Nel 2004 la Food and Drug Administration degli Stati Uniti ha approvato un farmaco analgesico chiamato ziconotide, che si basa su una molecola isolata dal mollusco gasteropode conico *Conus magus*. Il farmaco però non resiste all'ambiente estremo dello stomaco, quindi deve essere iniettato lentamente nei pazienti per via venosa, con una procedura scomoda. «Lo ziconotide non si è rivelato un grande affare», dice Craik.

Craik ha iniziato a ingegnerizzare antidolorifici ottenuti dalla tossina di *Conus victoriae*, un mollusco gasteropode conico imparentato con *C. magus*. La sua strategia consiste nel trasformare le molecole, che normalmente sono costituite da catene di amminoacidi, in strutture ad anello. Le molecole circolari sono strutture assai più stabili, perché gli enzimi dell'organismo non riescono a tagliarne le estremità. Il ricercatore ha unito le estremità di queste molecole e ha somministrato a ratti per via orale alcune dosi di questi composti circolari. Il composto chiamato cVc1.1 è risultato 100 volte più potente del gabapentin, farmaco usato comunemente per il dolore neuropatico. E all'inizio del 2014, al convegno dell'American Chemical Society tenutosi a Dallas, il ricercatore ha presentato cinque ulteriori conotossine a forma di anello,che hanno mostrato grande resistenza in una serie di studi preliminari.

Con decine di migliaia di specie velenose nel mondo, i ricercatori pensano che la scoperta di un composto che colpisca il bersaglio giusto, un composto che sia resistente e che possa essere prodotto facilmente in grandi quantità, sia solo questione di tempo. «Forse conosciamo non più dell'uno per cento dei composti attivi presenti in questi veleni», dice Baron.

Mark Peplow è giornalista scientifico

Cortesia Yasunori Koide

ter, dell'Hospital for Sick Children di Toronto. Con una serie di studi effettuati sugli animali, i ricercatori hanno scoperto che, in risposta a una lesione nervosa, la microglia – l'insieme di cellule immunitarie caratteristiche del sistema nervoso simili a PacMan – libera un segnale che induce i neuroni del midollo spinale a ridurre la propria componente di una molecola chiamata KCC2 che trasporta ioni («KC» sta per cloruro di potassio). Questa molecola con il ruolo di trasportatore mantiene il delicato equilibrio di ioni cloruro all'interno e all'esterno delle cellule. In condizioni normali, piccole cellule nervose nel midollo spinale chiamate interneuroni regolano la comunicazione tra le vie che veicolano sensazioni dolorose e quelle che si occupano delle sensazioni non dolorose. Queste piccole cellule nervose fanno in modo che un tocco ordinario non causi dolore. Tuttavia, quando i neuroni del midollo spinale perdono KCC2, questa comunicazione procede nel modo sbagliato, e anche un tocco leggero può scatenare dolore. I ricercatori hanno ipotizzato che se potessero ripristinare i livelli di KCC2 questo tipo di segnalazione impropria si bloccherebbe.

Nel novembre 2013 De Koninck e colleghi hanno annunciato la scoperta di un composto in grado di incrementare il trasporto del cloruro attraverso KCC2. Il composto ristabiliva l'equilibrio degli ioni cloruro e la funzione elettrica nei neuroni del midollo spinale, inoltre alleviava i segnali di dolore neuropatico in ratti di laboratorio. Questa sostanza stimolante per KCC2 si è dimostrata sicura e priva di effetti collaterali negli animali, addirittura a dosi elevate.

La maggior parte dei ricercatori ritiene che la medicina del futuro sarà personalizzata, cioè l'approccio terapeutico sarà a misura di paziente. Nel campo del dolore cronico, questo scenario è appena agli inizi

Sebbene fino a oggi le ricerche siano state effettuate esclusivamente su modelli animali, alcuni aspetti di KCC2 ne fanno un bersaglio terapeutico assai promettente. A differenza di farmaci che inibiscono i canali ionici nel loro insieme, il composto che incrementa il trasporto di cloruro agirebbe, per esempio, solo su cellule difettose, spiega De Koninck. Cellule con KCC2 funzionante continuerebbero a lavorare come al solito, e il composto non stimolerebbe in maniera eccessiva la loro attività. Alcuni esperimenti indicano che, invece di agire cambiando il modo in cui KCC2 si comporta, il composto indirizzerebbe una quantità maggiore di questo trasportatore verso la superficie cellulare. Una migliore comprensione dei meccanismi di controllo del traffico sarebbe essenziale per mettere a punto farmaci antidolorifici sicuri ed efficaci.

Cure personalizzate

La maggior parte dei ricercatori ritiene che la medicina del futuro sarà una medicina personalizzata. Ciò significa che i geni di un individuo e specifiche sensibilità a farmaci determineranno l'approccio terapeutico migliore e il modo più sicuro grazie a cui prevenire una malattia. Nel campo della gestione del dolore cronico, questo futuro ha iniziato a materializzarsi solo di recente. «Ci piacerebbe molto riuscire a dire che cosa, nel caso specifico, è andato storto per ciascun paziente. A quel punto potremmo dire "Bene, allora lei prenda questo farmaco, mentre lei, invece, prenda quell'altro"», spiega David Bennett, neurologo all'Università di Oxford. Tuttavia, addirittura nei centri migliori nei quali il dolore è gestito in maniera completa, l'approccio terapeutico si basa in gran parte su procedure di tipo «prova ed errore».

Oggi però pazienti con mutazioni genetiche rare che colpiscono i canali del sodio indicano la via per arrivare a una terapia personalizzata contro il dolore. Per esempio, la maggior parte delle persone che soffre di dolore bruciante agli arti tipico dell'eritromelalgia a causa di una mutazione ereditaria nel gene che codifica per $Na_v1.7$ non trae alcun beneficio dalla carbamazepina, un farmaco anticonvulsivante che in alcuni casi viene impiegato per trattare il dolore. Tuttavia in una famiglia con questo tipo di situazione è stata scoperta una particolare mutazione (ce ne sono di molti tipi) che determina una buona risposta a questo farmaco. Studiando la struttura molecolare e la funzione dei canali mutati di questa famiglia, Waxman e Dib-Hajj hanno osservato il modo in cui la carbamazepina riduceva l'iperattività del canale e sono stati anche in grado di prevedere con grande precisione che il farmaco sarebbe risultato efficace con una mutazione abbastanza diversa. «Queste scoperte sono stimolanti», dice Waxman, perché suggeriscono che basare la terapia sul corredo genetico di una persona «non è affatto irrealistico» per pazienti affetti da eritromelalgia ereditaria, e per coloro che soffrono di condizioni più comuni collegate al dolore.

Quanto a Jama Bond, i sintomi della donna si sono interrotti di punto in bianco proprio prima del parto di un bel bimbo sano. In modo del tutto inaspettato, una serie di iniezioni di farmaci steroidei che avrebbero dovuto aiutare i polmoni del bimbo a maturare sono state portentose anche per la madre. «Mi sono svegliata nel cuore della notte – ricorda la donna – e non avevo più dolore ai piedi, un sollievo che non avevo più sperimentato negli oltre sei mesi precedenti». Nessuno è riuscito a spiegare questo fenomeno. I sintomi sono poi ricomparsi, ma mai con la stessa intensità che la donna aveva dovuto patire durante la gravidanza. «Se sto in piedi per molto tempo, il risultato sarà che proverò dolore», confessa Bond. «Ma sto gestendo questa situazione e non prendo più farmaci. È sorprendente! Mi piacerebbe molto essere curata». Anche ai ricercatori che studiano il dolore piacerebbe molto portare sollievo a Bond e ai tanti milioni di persone che come lei soffrono per il dolore. ■

PER APPROFONDIRE

Black Mamba Venom Peptides Target Acid-Sensing Ion Channels to Abolish Pain. Diochot S., Lingueglia E. e altri, in «Nature», Vol. 490, pp. 552-555, 25 ottobre 2012.

Discovery of a Selective NaV1.7 Inhibitor from Centipede Venom with Analgesic Efficacy Exceeding Morphine in Rodent Pain Models. Yang S., in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 110, n. 43, pp. 17534-17539, 22 ottobre 2013.

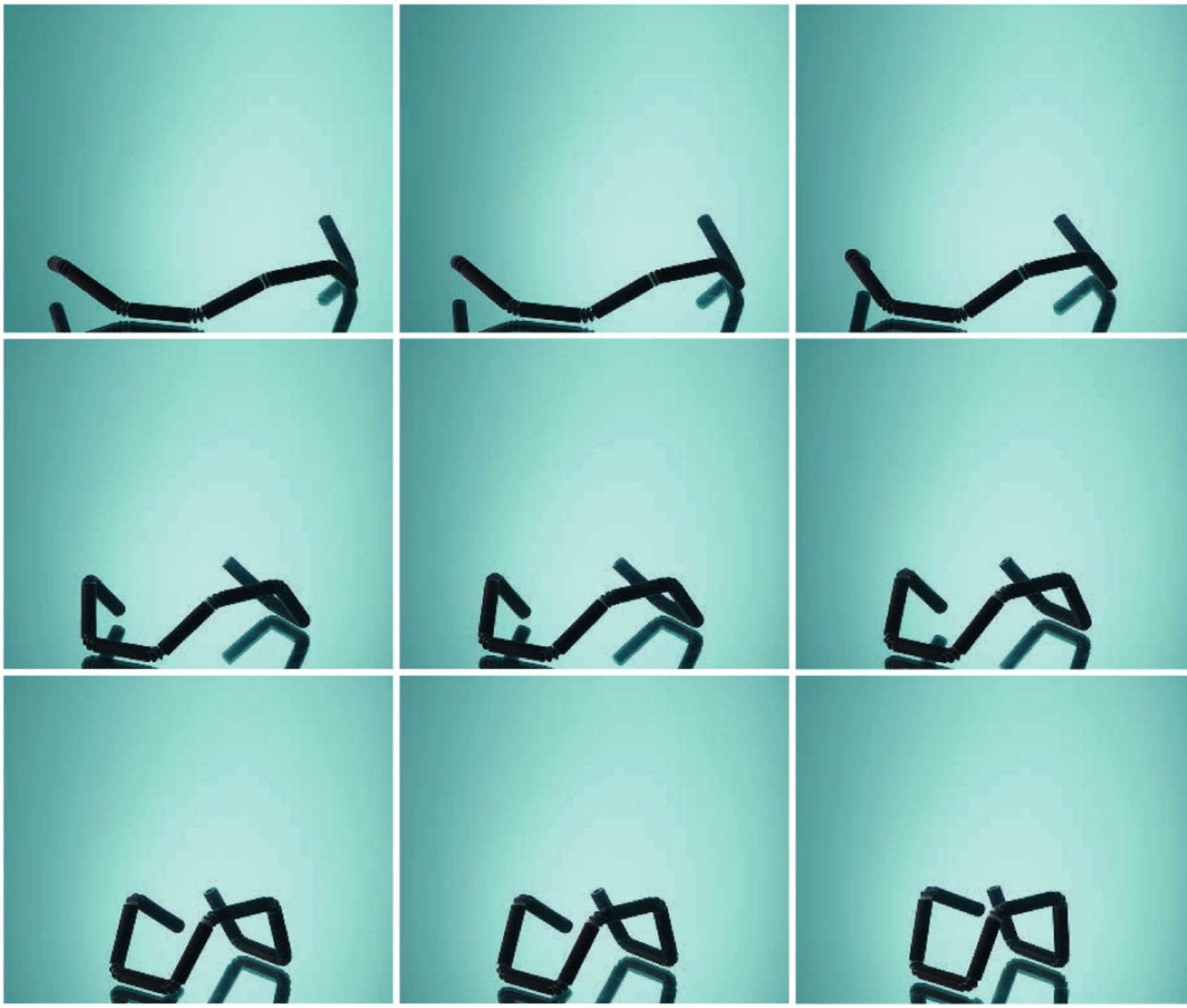
Pain Vulnerability: A Neurobiological Perspective. Denk F., McMahon S. B. e Tracey I., in «Nature Neuroscience», Vol. 17, pp. 192-200, febbraio 2014.

Regulating Excitability of Peripheral Afferents: Emerging Ion Channel Targets. Waxman S. G. e Zamponi G. W., in «Nature Neuroscience», Vol. 17, pp. 153-163, febbraio 2014.

Controllare il dolore. Basbaum A. I. e Julius D., in «Le Scienze», n. 456, agosto 2006.

INGEGNERIA MECCANICA

Il mondo program

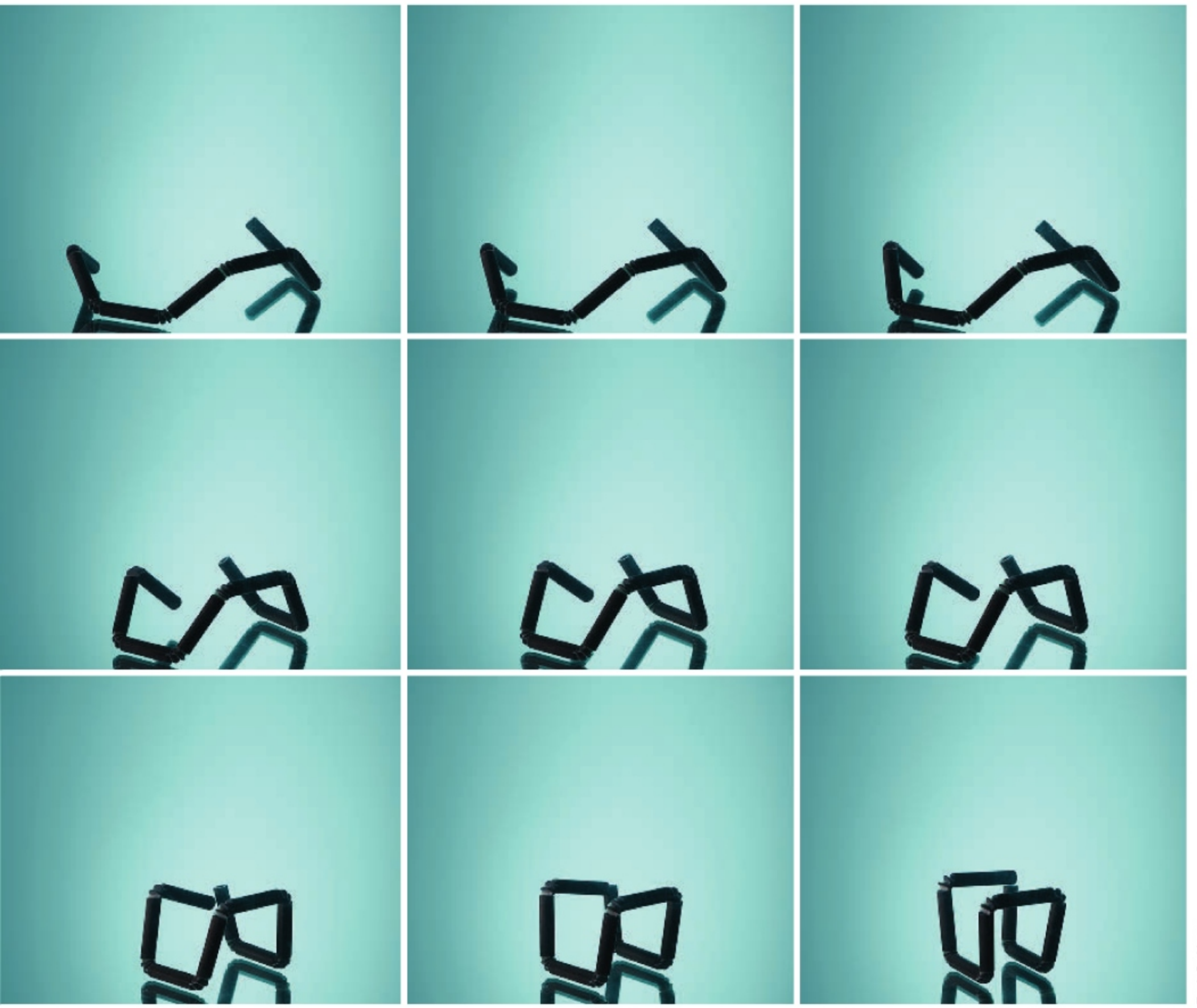


Materiali innovativi, stampanti 3D e un nuovo modo di concepire la progettazione potrebbero portare a oggetti in grado di montarsi da soli e cambiare forma o funzione a comando

di Thomas A. Campbell, Skylar Tibbits e Banning Garrett

mabile

Oggetti «programmati», come la catena di polimeri stampata in 3D che se immersa in acqua si piega formando un cubo, cambiano forma o funzione quando sono sottoposti a un fattore di innesco.

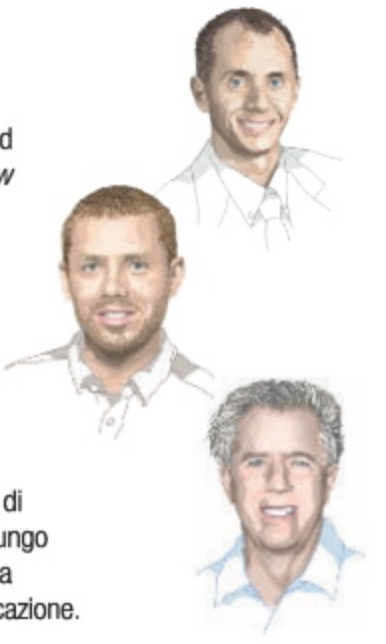


Travis Rathbone

Thomas A. Campbell è professore associato di ricerca all'Institute for Critical Technology and Applied Science alla Virginia Tech, e *nonresident senior fellow* presso l'Atlantic Council.

Skylar Tibbits è il direttore del Self-Assembly Lab e ricercatore del Dipartimento di architettura al Massachusetts Institute of Technology.

Banning Garrett lavora a Washington come analista di politiche strategiche: indaga sulle tendenze globali a lungo termine e sull'impatto della tecnologia sulla società. Ha collaborato con oltre 20 riviste e altri mezzi di comunicazione.



La strada verso case autoassemblanti e robot che cambiano forma potrebbe iniziare con qualcosa di semplice come una rete idraulica. Oggi, quando vogliamo costruire un'infrastruttura per spostare l'acqua in una città, prendiamo tubi rigidi con una capacità fissa e li interriamo. Il sistema funziona abbastanza bene, almeno fino a quando non abbiamo bisogno di aumentare il flusso d'acqua in un'area o non si rompe un tubo. In questi casi dobbiamo dissotterrare il tutto e sostituirlo.

Una bella alternativa sarebbero tubi flessibili in grado di cambiare forma a comando, o con un determinato livello di pressione, oppure capaci di ripararsi da sé in caso di rottura. Oggi, grazie ai progressi nel *computer-aided design* (CAD) e nella scienza dei materiali, questi tubi stanno diventando realizzabili. Gli stessi progressi, insieme con il nuovo tipo di progettazione che hanno consentito, potrebbero dare il via a un mondo di materia programmabile: oggetti capaci di autoassemblarsi, assumere nuove forme o cambiare caratteristiche a comando.

Gli scienziati già costruiscono macchinari autoassemblanti, ma sono piccolissimi: apparecchiature su scala nanoscopica che fanno da sensori biochimici, componenti elettronici o vettori di farmaci. Ci interessa che cosa succederà quando la materia programmabile raggiungerà la scala umana. Per ottenere questo obiettivo ci sono due modi. Uno consiste nel creare blocchi da costruzione scollegati, che si possano unire o separare autonomamente per formare strutture programmabili più grandi. Un altro metodo è costruire gli oggetti che cambiano forma come una sola struttura completa, cioè oggetti con cardini, punti di tensione o componenti elettronici incorporati nelle posizioni giuste per consentire loro di cambiare forma nelle circostanze desiderate.

Chiamiamo questo secondo metodo «stampa 4D». Come la stampa 3D, quella 4D consiste nel costruire oggetti precollegati deponendo uno strato di materiale dopo l'altro. In questo caso, però, una volta stampati gli oggetti possono cambiare forma o caratteristiche nel corso del tempo.

Con la materia programmabile si potrebbero creare oggetti in grado di risparmiare materiali, energia e manodopera. Immaginate una sedia che possa trasformarsi in un tavolo. Immaginate quei tubi flessibili che si riparano da soli. Potrebbe permettere di realizzare macchine complesse senza intervento umano nella costruzione. Questi sistemi sarebbero utili soprattutto in ambienti ostili, per esempio fuori dall'atmosfera terrestre. Si potrebbe lanciare nello spazio un piccolo contenitore compresso che, raggiunta l'orbita, si riconfigurerebbe per diventare un satellite funzionante. Altri apparecchi destinati all'uso nello spazio si potrebbero configurare per svolgere più funzioni: immaginate un pannello solare che può trasformarsi in un'antenna parabolica o una capsula di deposito.

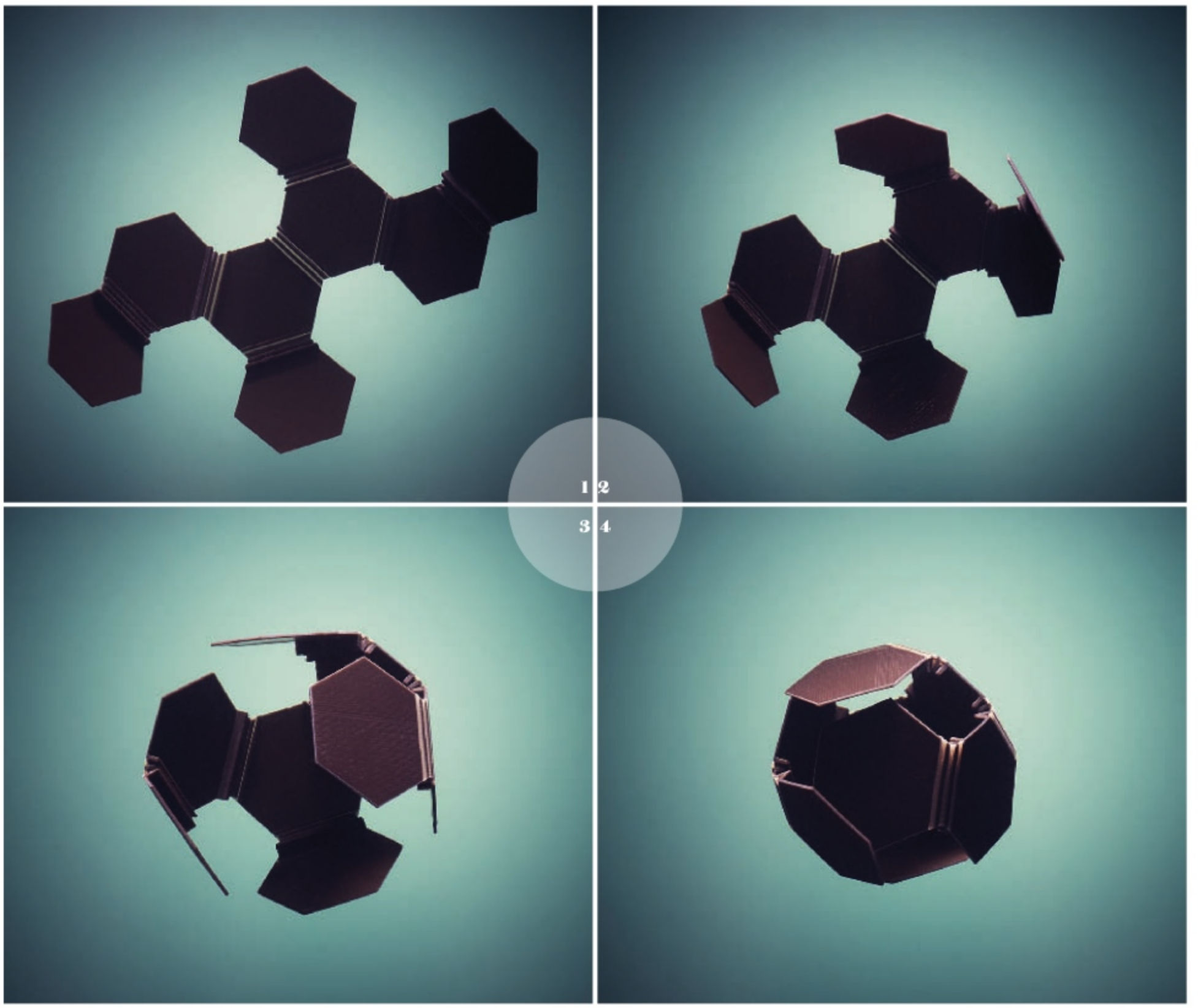
La materia programmabile potrebbe però generare anche nuovi problemi. Pensate a un mondo materiale che può essere attaccato dagli hacker. Le ali di aereo trasformabili potrebbero subire sabotaggi. Gli edifici potrebbero ricevere il comando di smontarsi mentre vi si trovano delle persone. Anche i diritti di proprietà intellettuale potrebbero diventare più complessi con l'arrivo dei prodotti che cambiano forma, creando questioni brevettuali che lo U.S. Patent and Trademark Office non ha mai neanche lontanamente immaginato. L'esistenza di simili rischi è un ulteriore motivo per cominciare già adesso il dibattito su questa tecnologia potenzialmente trasformativa, in modo che soluzioni, misure di controllo e politiche si possano applicare fin da subito.

Montaggio non necessario

Alcuni scienziati fantasiosi hanno cominciato a parlarne già nei primi anni novanta, ma la materia programmabile ha ricevuto un impulso notevole nel 2007, quando la U.S. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) ha finanziato un progetto in questo settore. La DARPA ha elaborato un piano pluriennale per progettare e costruire sistemi robotici su microscala in grado di trasformarsi in sistemi militari più grandi, per esempio *display* fisici e antenne specializzate. I ricercatori hanno ridotto la robo-

IN BREVE

La scienza della materia programmabile si occupa della progettazione di oggetti che possono cambiare forma o funzione in modo intenzionale e possibile da programmare.
Derivante dalla manifattura additiva, o stampa 3D, la materia programmabile potrebbe dare origine a robot che cambiano forma, satelliti in grado di attivarsi da sé e mobili o addirittura edifici autoassemblanti.
Ma gli apparecchi realizzati in questo modo potrebbero anche essere vittime di hacking e sabotaggio. Inoltre i prodotti in grado di trasformarsi da un apparecchio in un altro potrebbero creare notevoli controversie sulla proprietà intellettuale.



Gli apparecchi autopieganti si basano su materiali, situati nei punti mobili, che si espandono o si contraggono a contatto con calore, luce, elettricità o altri fattori di innesco. Questo ottaedro autoassemblante prende forma quando viene immerso nell'acqua.

tica fino a dimensioni millimetriche, simili alla larghezza di una matita. Nel giro di pochi anni sono riusciti a produrre piccolissimi robot che cambiano forma.

Uno di noi (Tibbits) ha lavorato ai metodi di impiego della stampa 4D per costruire queste macchine senza i meccanismi robotici (motori, cavi e componenti elettronici). Al Self-Assembly Lab del Massachusetts Institute of Technology (MIT), insieme con i suoi colleghi, ha realizzato tra le altre cose un oggetto simile a un serpente fatto di un polimero speciale, che se immerso in acqua si piega formando le lettere «MIT»; un'unica catena di polimero che, da questa scritta, si trasforma nelle lettere «SAL» (cioè Self-Assembly Lab); una superficie piana autopiegante che forma un ottaedro troncato; e infine un disco piano che, a contatto con l'acqua, si piega creando una struttura a *origami* curva e increspata.

Christopher B. Williams della Virginia Polytechnic Institute and State University, o Virginia Tech, ha incorporato cavi in lega e circuiti stampati in speciali strutture cedevoli mentre venivano stampate in 3D. Una volta completata la stampa si può impiegare un segnale esterno per azionare la struttura cedevole, cambiando la forma dell'oggetto. Questo metodo potrebbe introdurre innovazioni nella robotica, nel montaggio di mobili e nell'edilizia.

Williams e uno di noi (Campbell) sono andati oltre, abbinando la stampa 4D ai nanomateriali. Il loro inserimento in oggetti stampati in 4D crea nanocompositi multifunzionali, che cambiano caratteristiche reagendo alle onde elettromagnetiche (luce visibile e ultravioletta). Per esempio, questo gruppo ha stampato in 4D un logo della Virginia Tech, incorporandovi nanomateriali che cambiano colore in base alle condizioni di luce. Con un ulteriore sviluppo, questi materiali potrebbero introdurre una nuova categoria di sensori, da incorporare nelle apparecchiature mediche per valutare i valori estremi di parametri medici come pressione, livelli di insulina e altri.

Difficoltà computazionali

Oggi è facile stampare in 3D un logo «MIT» o «Virginia Tech» statico: basta inserire in una stampante 3D le istruzioni relative all'oggetto desiderato. Stampare oggetti che in seguito possano cambiare forma significa invece progettare caratteristiche pro-

Travis Rathbone

grammabili, come i punti di tensione e flessione, o incorporare nanomateriali nell'oggetto. Questo tipo di progettazione ha difficoltà computazionali, che vanno oltre le capacità del programma CAD attuale.

Facciamo un esempio: volete stampare qualcosa che possa trasformarsi da un tavolo in una sedia. Dal punto di vista topologico ci sono numerosi modi in cui un tavolo può piegarsi fino a diventare una sedia. Ma in gran parte non funzioneranno nel mondo reale, perché piegandosi l'oggetto si colpirà da solo o resterà attorcigliato. Trovare la soluzione migliore è una sfida di simulazione complessa. I ricercatori hanno messo a punto una libreria di meccanismi fisici che formano la base di qualsiasi oggetto vogliamo progettare: meccanismi per piegare, estendere, torcere, ridurre e altro ancora. La trasformazione dell'oggetto dipende dall'azione collettiva di questi blocchi da costruzione. Possiamo progettare gli oggetti in modo lineare – piega, piega, estendi – o invece programmarli in base alla logica – se succede questo, fai questo; se succede quello, fai quello.

Presto queste combinazioni diventano così complesse che è difficile prevederne il comportamento, quindi il primo passo verso la materia programmabile consiste nello sviluppare nuovi tipi di programmi di progettazione. I progettisti hanno bisogno di programmi che li aiutino a evitare problemi difficili da prevedere, come un oggetto che si attorcigli quando cambia forma. Come primo passo verso questo traguardo, il gruppo di Tibbit ha lavorato con l'azienda di programmi di progettazione Autodesk per sviluppare Project Cyborg, che simula e ottimizza la dinamica degli oggetti stampati in 4D. Usando Cyborg per la progettazione, la stampante multimateriale Connex di Stratasys per la produzione e un nuovo polimero, sviluppato sempre da Stratasys, che si espande del 150 per cento quando è immerso nell'acqua, il gruppo di Tibbits ha creato il logo MIT autopiegante e altri oggetti stampati in 4D.

Finora i ricercatori hanno progettato per lo più oggetti piuttosto semplici, in genere con un tipo di giunzione e due materiali. Ma ci sono già i materiali per costruire apparecchi più complessi, e quando aumenteremo ulteriormente questa varietà gli unici fattori limitanti saranno la nostra capacità computazionale, la nostra fantasia e le leggi della fisica.

Blocchi da costruzione

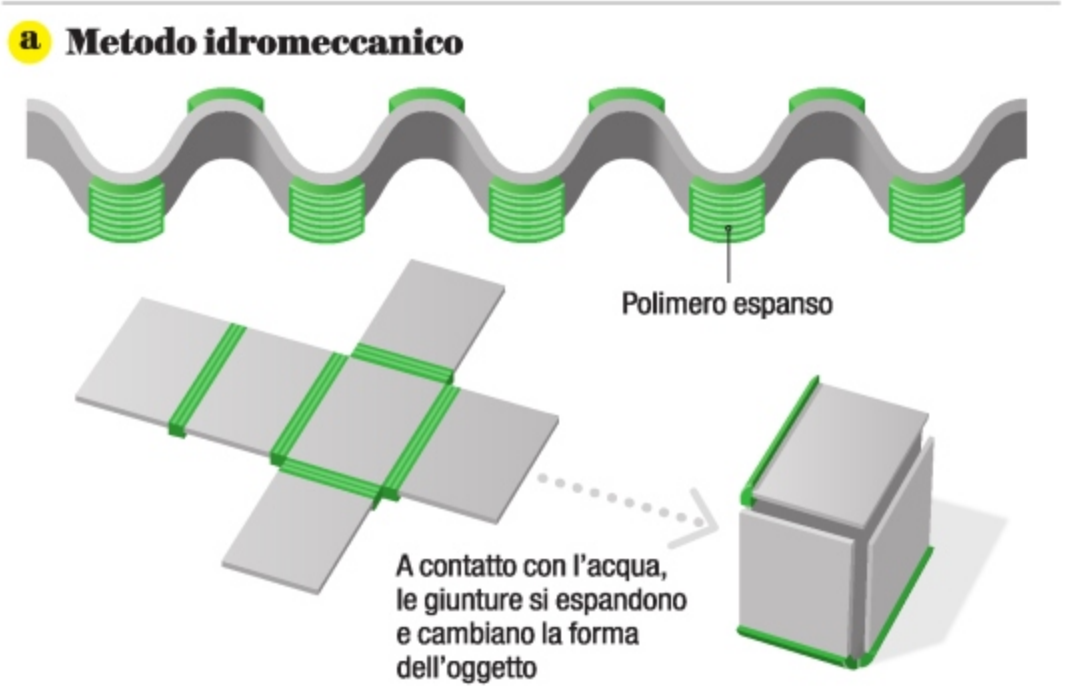
Uno strumento concettuale utile per considerare la materia programmabile è il cosiddetto *voxel*, o *pixel* volumetrico. Nella computazione, un voxel è un pixel nello spazio tridimensionale. Nella materia programmabile è un'unità fondamentale con cui si potrebbero costruire apparecchi complessi. Un voxel potrebbe essere una particella sintetica di grandezza variabile, costituita dai materiali più diversi, come silicio, ceramica, plastica o titanio. I voxel potrebbero essere adattati in modo da comportarsi come un qualsiasi sottosistema di una vasta gamma: un apparecchio per accumulare energia, un attuatore, un sensore, un conduttore, un isolante, uno schermo protettivo, un'antenna o perfino un microcomputer. I voxel si potrebbero montare e, insieme, programmare in modo che cambino forma o funzione, e formino collettivamente oggetti diversi.

Nel loro recente libro *Fabricated: The New World of 3D Printing*, Hod Lipson e Melba Kurman usano i voxel per tracciare un'analogia tra la materia programmata e la vita biologica. In

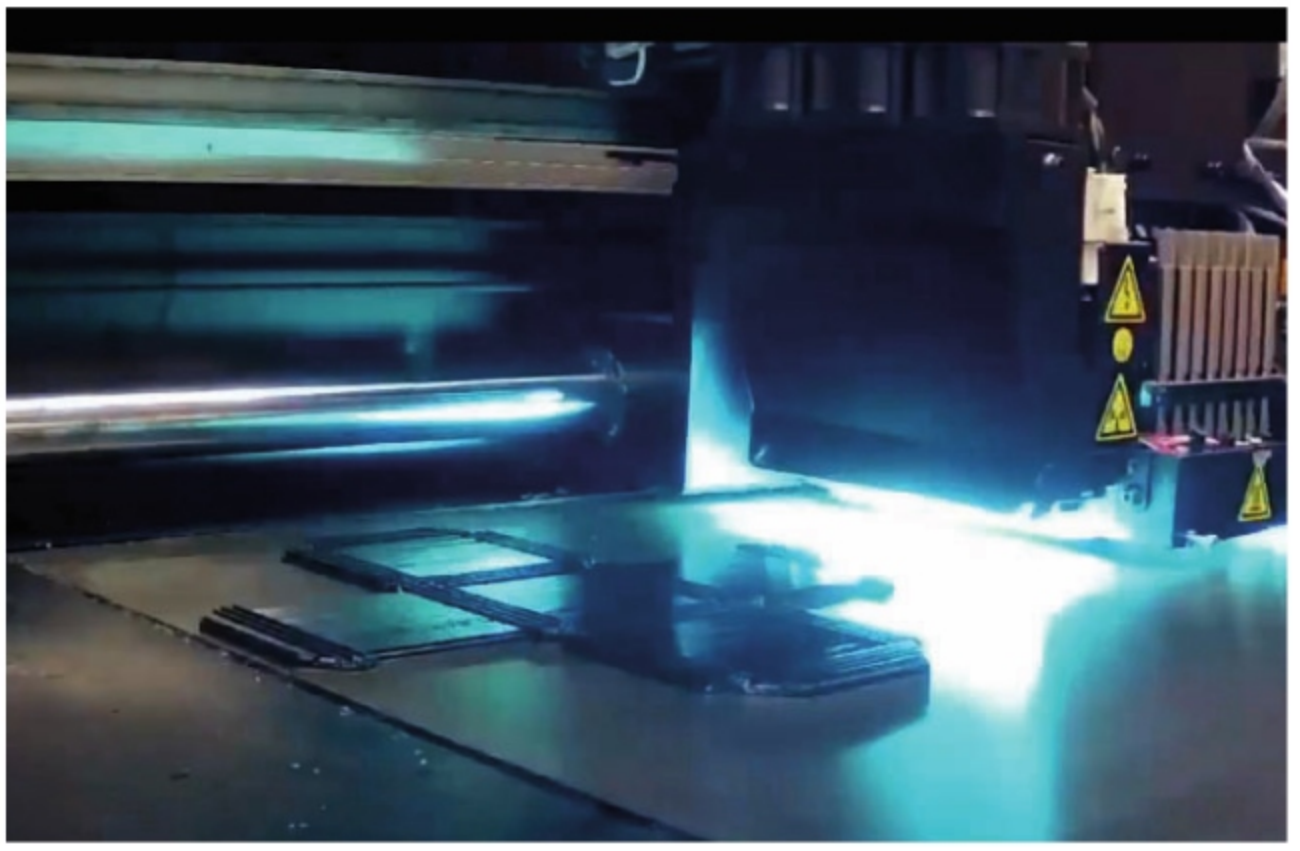
CONCETTI DI BASE

Stampa in 4D

Ci sono più modi di programmare la materia. Uno degli autori (Tibbits) ha usato le stampanti 3D per produrre oggetti i cui componenti sono collegati da un polimero che si espande a contatto con l'acqua (*a*). Quando la materia si espande, trasforma una striscia piatta in ondulata, oppure un gruppo bidimensionale di quadrati in un cubo.
H. Jerry Qi e Qi Ge, entrambi all'epoca dell'esperimento all'Università del Colorado, e Martin L. Dunn, della Singapore University of Technology and Design, hanno usato le stampanti 3D per realizzare oggetti multimateriale, programmati in modo da cambiare forma quando vengono riscaldati o raffreddati (*b*).



Fonte: *Active Materials by Four-Dimension Printing*, di Qi Ge, H. Jerry Qi e Martin L. Dunn, in «Applied Physics Letters», Vol. 103, n. 13, 2013



Le stampanti 3D, come la stampante multimateriale Objet500 Connex di Stratasys, possono incorporare al momento della produzione polimeri espansi e altri materiali funzionali.

Cortesia Self-Assembly Lab del Massachusetts Institute of Technology, Stratasys Ltd e Autodesk Inc.

fondo le numerose proteine degli esseri viventi sono costituite da 22 blocchi da costruzione: gli amminoacidi. «Se due dozzine scarse di elementi diversi danno origine a tutta la vita biologica, pochi tipi base di voxel possono a loro volta aprire un'ampia gamma di possibilità», scrivono Lipson e Kurman. Potrebbero esserci voxel rigidi e morbidi, voxel conduttivi per i cavi e circuiti elettrici in cui i voxel farebbero da resistore, condensatore, induttore e transistor. «Aggiungete voxel attuatori e sensori – continuano – e ottenete i robot».

I robot di questo tipo sono molto interessanti per le forze armate statunitensi. L'esercito e la marina degli Stati Uniti stanno già mettendo a punto soluzioni grazie a cui stampare in 3D i ricambi sulle navi o sul campo, perché evitare il trasporto e lo stoccaggio di migliaia di ricambi permetterebbe di risparmiare tempo, denaro e spazio. La materia programmabile aumenterebbe questi vantaggi. Immaginate di avere in un sottomarino un secchio di voxel. Se un pezzo si rompe o c'è bisogno di uno strumento specifico, basta prendere una serie di voxel e programmarli in modo che formino quello strumento. Quando questo non serve più gli si ordina di smontarsi, e i voxel torneranno disponibili per creare altri strumenti o pezzi.

Oltre a ricambi e strumenti, la materia programmabile potrebbe fornire uniformi in grado di adeguare l'isolamento termico e il raffreddamento all'ambiente circostante e ai dati biometrici di ciascuno. Nel 2014 l'esercito degli Stati Uniti ha investito quasi un milione di dollari in un progetto che impiegherebbe la stampa 4D per creare tute mimetiche dinamiche. Considerate un periodo molto lungo – e usate un po' di fantasia – ed è concepibile che la materia programmabile si possa usare per costruire robot trasformabili, in grado di superare gli ostacoli o attraversarli cambiando forma, analogamente al robot T-1000 nel film *Terminator 2*.

Un giorno la materia programmabile si potrebbe usare nell'edilizia di grandi dimensioni, in contesti sia militari che civili. Pensate alla possibilità di edifici autoassemblanti. Invece di posare mattoni o versare cemento, inseriamo nelle fondamenta un volume di materia programmabile grande come un palazzo e quindi diciamo agli elementi di «crescere» o «stabilizzarsi» in una struttura finita, completa di rete elettrica e idraulica. Questo metodo potrebbe sembrare inutilmente complicato per la normale costruzione di una casa nuova, ma in ambienti ostili – come zone di guerra o la superficie di Marte – l'autoassemblaggio diventa un'opzione interessante.

Il futuro autoassemblante

Abbiamo citato solo alcuni dei modi in cui i ricercatori in futuro potrebbero applicare la materia programmabile. E se le ali degli aerei potessero cambiare forma in base alle variazioni di pressione, atmosferica e temperatura? E che dire di pneumatici con una superficie di presa variabile a seconda delle condizioni stradali e meteorologiche? I materiali autoriparanti potrebbero proteggere gli aerei o aiutare i ponti ad adattarsi a un aumento improvviso del traffico, o perfino ai terremoti. O ancora, mobili autoassemblanti? Chiunque abbia fatto acquisti all'Ikea apprezzerebbe una cassettiera piatta al momento dell'acquisto ma in grado di assumere automaticamente la forma giusta a comando.

Queste idee potrebbero sembrare magia, ma si basano su ingegneria e ricerca scientifica reali, anche se ancora permangono grandi ostacoli. A parte le difficoltà computazionali che pone, la materia programmabile dovrà rivoluzionare la scienza dei materiali e la loro produzione. Per creare il logo del MIT autopiegante e quello della Virginia Tech sensibile alla luce citati in precedenza, i ricercatori hanno avuto bisogno di polimeri completamente nuovi. Che tipi di nuovi materiali serviranno per costruire una casa autoassemblante o un'ala di aereo trasformabile? Una volta sviluppati i blocchi da costruzione, dobbiamo ancora affrontare la sfida di montarli per formare oggetti grandi e complessi. Come è possibile tenere uniti i voxel? Come dobbiamo programmarli e che tipo di energia possono usare per autoassemblarsi?

Ammesso che si riesca a risolvere questi problemi, ci troveremo ancora di fronte alle sfide citate prima, tra cui la vulnerabilità all'*hacking* e controversie complesse sulla proprietà intellettuale. Prossimamente dovremmo avere occasione di affrontare queste sfide. Da un anno e mezzo Tibbits sta lavorando con varie aziende per sviluppare materiali, prodotti e sistemi costruttivi in grado di cambiare forma, mentre Campbell e Williams stanno trattando con un'azienda per applicare la stampa 4D con i nanomateriali come sistema anticontraffazione. Forse la casa autoassemblante è meno lontana di quanto sembri. ■

PER APPROFONDIRE

Additive Manufacturing (AM) and Nanotechnology: Promises and Challenges. Ivanova O. e altri, in «Rapid Prototyping Journal», Vol. 19, n. 5, pp. 353-364, 2013.

Fabricated: The New World of 3D Printing. Lipson H. e Kurman M., Wiley, 2013.

4D Printing: Multi-Material Shape Change. Tibbits S., in «Architectural Design», Vol. 84, n. 1, pp. 116-121, gennaio-febbraio 2014.

The Next Wave: 4D Printing: Programming the Material World. Campbell T. A., Tibbits S. e Garrett B, Atlantic Council, maggio 2014. **www.atlanticcouncil.org/images/publications/The_Next_Wave_4D_Printing_Programming_the_Material_World.pdf.**

Nanotecnologie a doppia elica. Seeman N.C., in «Le Scienze» n. 430, luglio 2004.

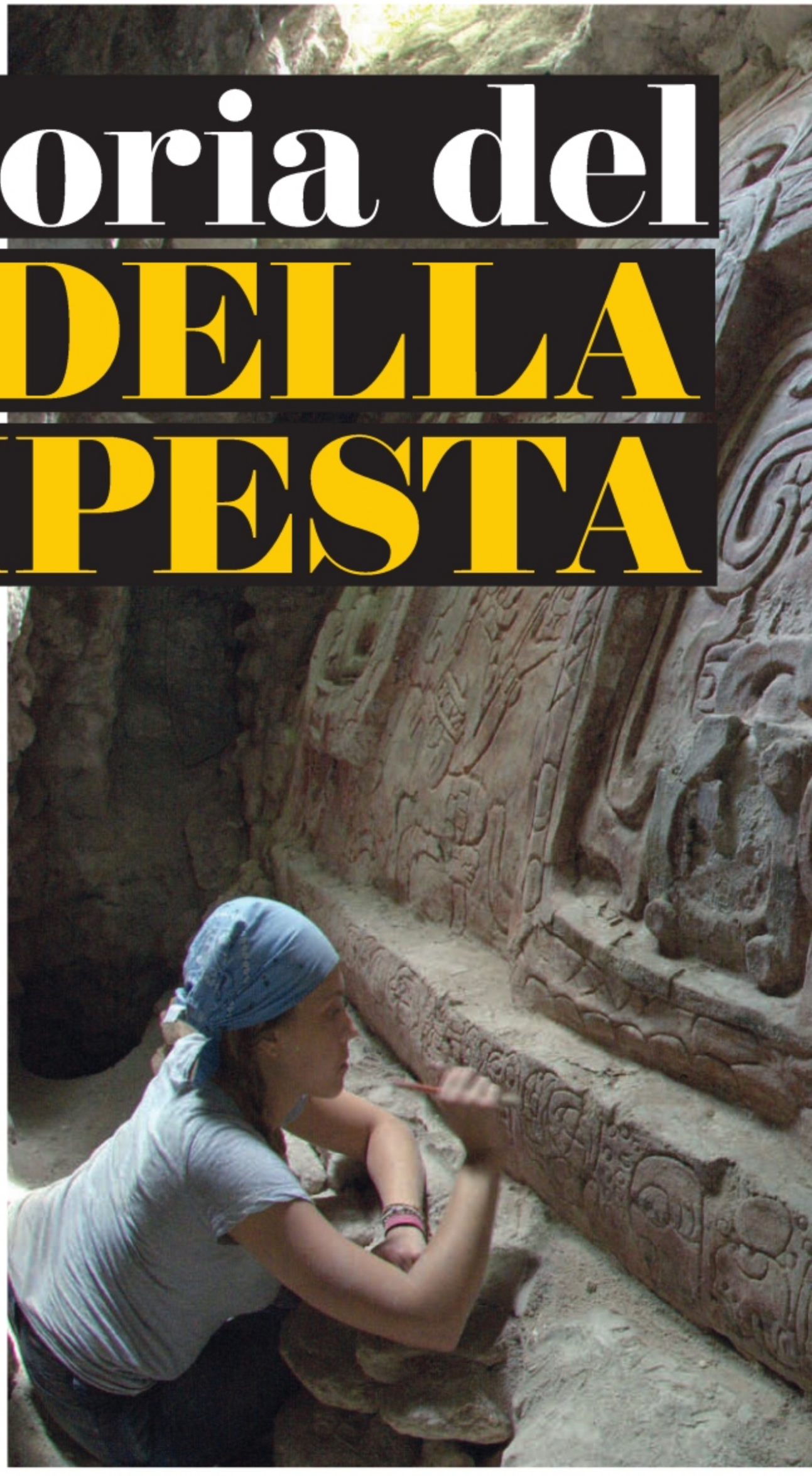
La storia del DIO DELLA TEMPESTA

Opere d'arte maya appena scoperte gettano luce su un antico conflitto

di Zach Zorich

Il re era nascosto nell'oscurità da oltre 1400 anni. Quando gli archeologi l'hanno scoperto, al suo volto finemente inciso mancava una metà, ma il copricapo elaborato e gli stemmi del suo rango erano ancora interi. Con un occhio solo, fissava la galleria che i visitatori avevano scavato dentro uno dei maggiori monumenti nell'antica città maya di Holmul, situata nell'attuale Guatemala nord-orientale. I geroglifici vicino alla figura precisavano il suo nome: Och Chan Yopaat, cioè «il dio della tempesta arriva in cielo».

Il re è la figura centrale di un pannello scultoreo scoperto recentemente, che ha scatenato l'entusiasmo degli archeologi che studiano la civiltà dei Maya. Francisco Estrada-Belli, dell'Università di Boston, aveva scavato il monumento – una piramide a base rettangolare con una sommità piatta dove si svolgevano cerimonie – per cercare di saperne di più sugli sviluppi politici durante un periodo particolarmente tumultuoso della storia maya. All'interno della piramide si trovano i resti di tutti gli edifici dei secoli precedenti che una volta sorgevano nello stesso punto, prima che su di loro fossero costruiti templi più grandi.



Un fregio straordinario scoperto nell'antica città di Holmul, in Guatemala, sta aiutando gli archeologi a ricostruire il funzionamento degli Stati dei Maya durante la lunga guerra che segnò la storia di questa civiltà per oltre 1000 anni.

AP Photo

IN BREVE

Uno scavo nell'antica città di Holmul, in Guatemala, ha rivelato un fregio elaborato che sta aiutando a chiarire un capitolo cruciale della storia della civiltà maya.

Si ritiene che il fregio rappresenti il fondatore della dinastia che governò Holmul, coinvolta a causa della sua posizione strategica nel conflitto tra due superpotenze.

Ricca di simboli e iscrizioni, l'opera d'arte contiene informazioni che gli archeologi cercavano da tempo su come furono governati i Maya durante questo periodo critico.

Estrada-Belli e il suo team stavano scavando tunnel attraverso queste strutture concentriche, esaminando ciò che restava di quei monumenti precedenti, quando si sono imbattuti nella base di una scala. Nell'estate del 2013 hanno seguito le scale fino al fronte di un tempio alto circa nove metri, che in qualche modo era sfuggito alla demolizione. Lo splendido fregio – una distesa di stucco dalla lavorazione minuziosa, di circa 8 metri di lunghezza per 2 di altezza – decorava la parte superiore del tempio.

Il fregio però non ha solo una funzione ornamentale: è anche un documento storico, che sta aiutando gli archeologi a capire come funzionavano gli Stati maya in un periodo di cambiamenti drastici. All'epoca in cui fu realizzato il fregio, intorno al 590 d.C., Holmul si trovava al centro di un conflitto che, secondo molti studiosi, ha segnato la storia maya per oltre 1000 anni: la guerra tra i regni di Tikal e Kaanul. Gli esperti ritengono che il re raffigurato sul fregio fosse il fondatore della dinastia che governò Holmul in questa epoca cruciale. Se hanno ragione, la scoperta potrebbe contribuire a risolvere annose questioni sul modo di governare dei Maya.

Scritto nello stucco

Il motivo di questa lunga guerra si è perso nel tempo, ma molti studiosi sono convinti che riguardasse l'accesso alla ricchezza. Con ogni probabilità, i grandi feudatari di Tikal e Kaanul lottavano per controllare le rotte commerciali di beni come l'ossidiana per produrre attrezzi e armi, la giada per realizzare oggetti sacri e i semi di cacao, usati sia come valuta sia come ingrediente principale in una bevanda al cioccolato consumata durante i rituali religiosi. Probabilmente Holmul era solo una tra decine o centinaia di città appartenenti alla rete di partner commerciali che incanalava la prosperità economica della regione verso la capitale del regno alleato, qualunque essa fosse in un dato periodo. Per gli archeologi sta però diventando una città molto importante grazie alla ricchezza di informazioni, tanto sul sito stesso quanto sulla politica dell'epoca, conservata nelle sue rovine.

L'analisi del tempio e del suo fregio spettacolare è ancora in corso, ma Estrada-Belli e i suoi colleghi hanno già cominciato a chiarire ciò che racconta su Holmul in un periodo cruciale per la storia della città. Uno dei modi in cui i governanti maya usavano le enormi ricchezze accumulate consisteva nel costruire monumenti destinati a ingraziarsi gli dei e gli spiriti di importanti antenati che avevano permesso la loro prosperità, e ad assicurarsi la loro benevolenza anche in futuro. Sembra che il tempio di Holmul servisse esattamente a questo scopo: i glifi sui lati della struttura lo identificano come una «casa di lignaggio reale», cioè un tempio per adorare gli antenati della famiglia regnante.

Per decodificare il fregio, ricco di simboli, Estrada-Belli si è avvalso dell'aiuto di Karl Taube, esperto di iconografia maya presso l'Università della California a Riverside. Il re al centro, osserva Taube, è seduto sopra una divinità mitologica di montagna, detta Witz. Le grotte ai lati delle montagne erano passaggi per gli inferi e fonti di vento e pioggia. Sul fregio, il re è seduto sopra una fessura in cima alla montagna, e dagli angoli della bocca di Witz emergono due serpenti piumati che rappresentano il vento. «Penso che qui stiano indicando il re, giustapposto a un luogo sacro, forse quello d'origine», ipotizza Taube, osservando che «la fessura è un luogo in cui emergono gli antenati» dagli inferi. I maya credevano che la parte del mondo situata sotto terra e sott'acqua fosse abitata dai morti, oltre che da molti esseri soprannaturali sinistri. Le grotte rappresentavano i passaggi tra questi mondi.

Zach Zorich vive in Colorado e lavora come scrittore free lance e collaboratore di «Archaeology».

Il re è affiancato da figure che rappresentano la morte e la notte. Secondo Taube, sono gli dei-giaguaro degli inferi. Dato che i giaguari sono predatori notturni, i vari gruppi maya attribuivano loro numerosi significati. Rappresentano il Sole di notte, quando si credeva che il Sole viaggiasse attraverso la terra dei morti. Un aspetto interessante è che, mentre di solito nelle opere d'arte maya i re sono raffigurati mentre fanno offerte agli dei, in questo fregio sono invece gli dei-giaguaro che fanno offerte al re. Non è chiaro il motivo per cui questo rapporto è invertito, tranne il fatto che mette in risalto l'importanza di Och Chan Yopaat e, per estensione, della famiglia regnante.

Tuttavia, una striscia di glifi in fondo al fregio aggiunge un tocco curioso a questa storia di autocelebrazione. Secondo Alexandre Tokovinine, epigrafista della Harvard University che ha tradotto l'iscrizione antica, si afferma che il tempio fu commissionato dal re di Naranjo, una città vicina più grande e potente. L'iscrizione identifica il re di Naranjo come la persona che restaurò la dinastia regnante di Holmul. Sempre secondo l'iscrizione, però, il re di Naranjo era un vassallo del grande feudatario di Kaanul, cioè un governante a lui subordinato. Così, sebbene le immagini del fregio glorifichino il ruolo del re di Holmul nel cosmo, i glifi rivelano che in realtà Holmul si trovava in fondo a una gerarchia su tre livelli: il re di Holmul era un vassallo del sovrano di Naranjo, che a sua volta era un vassallo del grande feudatario di Kaanul. «Dimostra che tutti i regni maya erano collegati», spiega Estrada-Belli. «Non sapevamo come Holmul si inserisse nello schema complessivo della geopolitica maya, finché questa iscrizione non ci ha fornito tutte quelle informazioni».

Guerre continue

I dettagli del tempio e del fregio si aggiungono a un numero crescente di prove che confutano la visione tradizionale secondo cui gli antichi Maya erano un popolo pacifico. Tra il 1995 e il 2000, Simon Martin dell'Università della Pennsylvania e Nikolai Grube dell'Università di Bonn, in Germania, hanno decifrato e mappato i rapporti di potere testimoniati dai monumenti sparsi in tutto il territorio maya, dal Messico meridionale all'Honduras settentrionale. Il loro lavoro ha dimostrato che le guerre erano frequenti e che ogni città aveva il suo posto in una gerarchia rigida. Anche se i singoli re sembravano indipendenti, tutti erano subordinati o alla dinastia Tikal o a quella Kaanul. «Queste dovevano essere le superpotenze, che sostanzialmente esercitavano un'egemonia su tutti gli altri regni maya», spiega Estrada-Belli.

«La domanda era: "Chi avrà la supremazia?" [in questo periodo di tempo]», osserva Martin. Fin verso la metà del VI secolo sembrò prevalere Tikal. Si ritiene che un forte rapporto con la potente città-stato di Teotihuacán, nel Messico centrale, abbia aiutato Tikal a espandere la propria influenza verso est, in tutta la penisola dello Yucatán e la regione di Petén, nel Guatemala settentrionale. La

Holmul occupava una posizione strategica importante tra le capitali dei due Stati maya di Tikal e Kaanul.

città di Teotihuacán crollò intorno al 550, e nel 562 Tikal subì una sconfitta militare devastante, in seguito a cui nella città non fu realizzata alcuna costruzione di rilievo per oltre 130 anni. In quel periodo i governanti Kaanul cominciarono a espandere la propria influenza in tutta la regione. Tra le città dominate dalla dinastia Kaanul in questo periodo c'era Holmul.

Secondo Estrada-Belli, il fatto che la dinastia di Holmul abbia dovuto «essere sistemata», come indicano i glifi sul fregio, fa intuire che Tikal in precedenza avesse conquistato Holmul, probabilmente in un certo momento del V secolo d.C., esautorandone la famiglia regnante. Quando il regno Kaanul riconquistò la città, riportò al potere la famiglia regnante originale. Tokovinine ha un'interpretazione diversa: sospetta che i governanti di Naranjo possano avere cambiato alleanza, passando da Tikal a Kaanul e portando con sé Holmul. In ogni caso, grazie alla sua posizione strategica, tra la capitale di Kaanul a nord e la città di Tikal a ovest, Holmul sarebbe stata un'acquisizione preziosa.

Eppure, anche se il re di Holmul era subordinato al grande feudatario di Kaanul, per alcuni aspetti poteva avere una certa libertà. Diversamente dagli imperi come quello romano o egizio, che governavano direttamente i territori conquistati, le superpotenze maya preferivano lasciare che continuassero a governare le autorità locali, da cui però esigevano le tasse. Spiega Martin: «Erano molto interessate a stabilire rapporti di dominio. Lo erano quasi sicuramente a riscuotere i tributi, ma non molto a [insediare] guarnigioni o espandere il proprio territorio. In quel senso, era un quadro molto decentralizzato».

Superpotenza o impero?

La natura decentralizzata del governo maya alimenta un dibattito su questo punto: gli Stati di Tikal o Kaanul erano superpotenze o imperi? Secondo Martin, le aree geografiche che dominavano erano troppo piccole – l'intera regione maya era estesa solo circa come il New Mexico – e il controllo che esercitavano sui regni subordinati era troppo instabile perché questi stati si potessero paragonare agli imperi di Europa, Africa e Asia. Martin preferisce usare il termine «superpotenza» per indicare gli Stati maya, più piccoli e relativamente instabili.

Estrada-Belli non è d'accordo: a suo parere, man mano che i monumenti come il fregio di Holmul gettano luce sui rapporti di potere tra le città, si avvalora la tesi che si trattasse di imperi. «È ora di cambiare paradigma», insiste. «I Maya sembrano più a una civiltà che in una certa epoca è stata governata da un re: per esempio i Kaanul in questo periodo. Quindi sono molto simili ad alcune delle grandi civiltà del mondo antico».

Stabilire se Kaanul e Tikal fossero superpotenze o imperi è importante per capire come funzionassero nella quotidianità questi Stati maya, e perché entrassero in guerra così spesso. In entrambi i casi, con ogni probabilità Holmul avrebbe pagato un tributo di qualche tipo a Naranjo, che a sua volta avrebbe fatto altrettanto con il signore di Kaanul. Ma i reperti archeologici non spiegano che cosa Holmul potesse ricevere in cambio, sempre che lo ricevesse.

«Dovevano esserci dei buoni rapporti», sostiene Martin. Ipotizza che le élite di Holmul ricevessero doni esotici e fossero invitate a banchettare e celebrare cerimonie nella capitale di Kaanul per essere convinte ad assecondarne le ambizioni.

David Freidel, della Washington University a St. Louis, ha una visione diversa di questo rapporto: ritiene che il tributo imposto dai governanti di Kaanul ai regni loro subordinati creasse una relazione economica nettamente sbilanciata. «Il flusso di risorse, tra cui beni commerciali e soldati per combattere le guerre continue, andava interamente verso le capitali delle due superpotenze», sostiene. «Non c'è dubbio che fosse uno sfruttamento».

Freidel, condirettore degli scavi in un'altra città vassalla di Kaanul, ritiene che sotto molti aspetti gli Stati maya fossero simili a quelli di altre parti del mondo che costruivano monumenti per glorificare i propri capi, per esempio le piramidi egizie o gli archi di trionfo romani. «Amavano l'estetica del potere», osserva. «Ed è così in tutte le civiltà. Questo fregio ne è un esempio perfetto, e l'hanno sepolto perché era bellissimo e volevano, per così dire, mantenerlo vivo nella memoria». Il fregio di Holmul potrebbe essere stato sepolto per evitare la rabbia di quegli stessi dei e antenati cui doveva rendere omaggio, perché su di esso fu costruito un monumento più grande. I governanti di Holmul poterono così continuare a costruire nuovi monumenti grandiosi e al tempo stesso, in un certo senso, avere ancora quelli vecchi.

Freidel è d'accordo con gran parte delle interpretazioni di Martin e Grube sul nuovo fregio, ma sostiene che gli Stati maya, man mano che gli archeologi fanno scoperte sulla loro storia, siano sempre più identificabili come imperi. Un contributo decisivo al dibattito potrebbe arrivare dalla prosecuzione degli scavi nel tempio sepolto di Holmul e in altri siti. Estrada-Belli prevede di estendere la galleria intorno al resto dell'edificio. Inoltre intende esaminare due stanze appena scoperte all'interno del tempio, e continuare a riportare alla luce le sue pareti esterne. Per quanto grande, il fregio copre solo la sommità di un lato dell'edificio. Sul resto del monumento potrebbero esserci molte altre decorazioni, in grado di offrire nuove informazioni sul ruolo di Holmul nelle alterne fortune della battaglia secolare tra quegli antichi Stati. ■

PER APPROFONDIRE

Remote Sensing and GIS Analysis of a Maya City and Its Landscape: Holmul, Guatemala. Estrada-Belli F. e Koch M., in «Remote Sensing in Archaeology», a cura di Wiseman J. e El-Baz F., Springer, 2007.

La scrittura maya. Stuart D. e Houston S.D., in «Le Scienze» n. 254, ottobre 1989.

Illustrazione di Nick Higgins

Accendete i motori.
Todd Reichert siede ai comandi di Atlas mentre Cameron Robertson sistema i cavi.

David Noonan è uno scrittore *freelance* di scienza ed è stato *senior editor* di «Newsweek».

AERONAUTICA

Un volo impossibile

Secondo le conclusioni degli esperti, un elicottero alimentato dalla sola energia muscolare umana non potrebbe volare: due giovani ingegneri li hanno smentiti, vincendo 250.000 dollari

di David Noonan

IN BREVE

Da più di trent'anni i progettisti aeronautici cercavano di far volare per almeno un minuto, fermo a mezz'aria, un elicottero alimentato dalla sola forza meccanica generata dall'uomo, sconfitti dalle difficoltà del volo verticale e dai limiti di potenza del motore. Il Sikorsky Prize, promosso per ispirare la nuova generazione di ingegneri, non aveva ancora trovato un vincitore. **Usando rotori giganti** per compensare i limiti di potenza e rivedendo ogni ipotesi relativa alla progettazione di elicotteri, due ingegneri di Toronto, Todd Reichert e Cameron Robertson, si sono aggiudicati il premio nel 2013. **Costruito da una piccola squadra** di persone con materiali di facile reperimento, il velivolo dimostra che l'innovazione avanzata non appartiene solo alle grandi aziende ad alta tecnologia.

Reed Young

Nel 2011, quando cominciarono a costruire un elicottero a propulsione umana in grado di mantenersi in volo stazionario a tre metri d'altezza per 60 secondi, Todd Reichert e Cameron Robertson affrontavano un importante ostacolo: l'impresa era ritenuta impossibile. Gli esperti avevano raggiunto questa conclusione dopo trent'anni di incidenti e collisioni iniziati nel 1980, quando l'American Helicopter Society (ora AHS International) aveva offerto, a chi fosse riuscito nell'impresa, un premio che raggiunse la somma di 250.000 dollari. Ogni prova suggeriva che un solo pilota non potesse generare l'energia sufficiente per volare così in alto e per un tempo così lungo.

Nel 2007 l'ingegnere aeronautico Antonio Filippone, dell'Università di Manchester, elaborò i dati della questione in un articolo pubblicato sul «Journal of the American Helicopter Society», concludendo che l'idea – e qualsiasi velivolo basato su di essa – non avrebbe mai funzionato: «Nel complesso i requisiti della American Helicopter Society sono realisticamente irraggiungibili».

Il trentaduenne Reichert e il ventisettenne Robertson sono venuti a conoscenza dell'articolo di Filippone solo dopo avere vinto il denaro e il premio - conosciuto come AHS Sikorsky Prize - nel giugno 2013 con un volo da record effettuato con un gigantesco velivolo chiamato Atlas, dotato di quattro rotori e alimentato a pedali.

Pochi, rapidi e flessibili

Come una gigantesca macchina volante costruita con i pezzi del meccano, la struttura di Atlas, uno scheletro di quattro telai composti di sottilissimi tubi in fibra di carbonio e cavi ad alta tecnologia, forma una gigantesca X dell'ampiezza diagonale di 27 metri. I quattro rotori, del diametro di 20,5 metri ciascuno, in legno di balsa e pellicola Mylar trasparente, sono posti alle estremità dei bracci della X. Sospesa al centro con cavi sottilissimi, c'è una bicicletta da corsa modificata su cui Reichert, il motore umano di Atlas, trasmette la potenza della pedalata alle coppie di eliche mediante un intricato sistema di cavi e bobine. L'energia prodotta solleva da terra i 55 chilogrammi del velivolo.

Il volo di 64 secondi completato da Reichert e Robertson ha dimostrato, dopo i numerosi fallimenti del passato, che in un'epoca dominata dalle grandi squadre di progettisti pagate da multinazionali come Lockheed Martin e Northrop Grumman, un agile e svelto gruppetto riesce a risolvere i problemi più complessi. Benjamin Hein, *senior engineer* per Sikorsky Aircraft e presidente del comitato del Sikorsky Prize nel 2013, spiega che la sfida fondamentale consisteva nel trovare il peso e le dimensioni ideali per un velivolo dotato di una fonte di energia molto limitata, inventare un rotore ottimale e progettare un valido sistema di controllo del volo. Secondo Hein, inoltre, l'industria può trarre una grande lezione da questo episodio, soprattutto dalla capacità di Reichert e Robertson di fermarsi ogni volta per modificare rapidamente il progetto. «È esattamente quello che le grandi aziende non riescono a fare».

Un'altra dimostrazione della forza dei pochi è il programma per computer portatile elaborato da Reichert e Robertson, che ora fa parte di un pacchetto di programmi usato dalla NASA per configurare veicoli in grado di volare molto più lontano di Atlas. I due ingegneri vogliono sfruttare il pacchetto il prossimo anno per partecipare, con il progetto di un aeroplano a propulsione umana, al premio Kremer Marathon messo in palio per il primo velivolo che completerà un percorso di 42,195 chilometri in meno di un'ora. (Il record di velocità attuale è di 44,3 chilometri all'ora, raggiunto in un volo durato poco più di due minuti).

Novelli Wright

Descrivendo l'avventura di Reichert e Robertson è difficile non evocare un'altra coppia di inventori indipendenti, Orville e Wilbur Wright. Come i fratelli Wright, i due – che si sono conosciuti quando erano studenti di ingegneria all'Università di Toronto e ora dirigono AeroVelo, un loro gruppo «di progettazione e innovazione» – hanno in comune la passione per il volo umano. Il loro obiettivo, spiega Reichert, è «mostrare alle persone che cosa si può fare mettendo al primo posto l'efficienza». È per questo motivo che Reichert e Robertson preferiscono usare materiali in circolazione da decenni come legno di balsa, polistirolo espanso e Mylar, ed è sempre per questo motivo che accettano di lavorare con i limiti dell'energia umana. Questo significa che non possono decidere di acquistare motori migliori, spiega Robertson. «Devi risolvere il problema senza modificare la potenza del motore. Non puoi semplicemente aumentarla». E di sicuro i venditori di biciclette Wilbur e Orville avrebbero apprezzato il ruolo centrale del mezzo ciclistico nelle invenzioni di Reichert e Robertson. Prima di Atlas i due avevano costruito un marchingegno alato azionato a pedali detto ornitottero.

Ma ad accomunare Reichert e Robertson e i fratelli Wright è soprattutto il metodo. «I fratelli Wright avevano una particolare inclinazione per la meccanica», ricorda Reichert. «Sapevano riparare le cose, metterle a punto, ma avevano anche un grande rigore scientifico, ed è esattamente la combinazione che occorre».

Non essendo progettisti di elicotteri, i due ingegneri canadesi non conoscevano gli articoli scientifici che condannavano all'insuccesso la loro impresa. Sapevano però che i complessi calcoli necessari a realizzare il progetto avrebbero richiesto ore e ore di tempo macchina a un costosissimo supercomputer che i due non potevano permettersi di acquistare. Si rendevano inoltre conto che il loro programma doveva migliorare l'approccio convenzionale alla progettazione aeronautica, in cui le componenti strutturali e aerodinamiche sono sviluppate da gruppi di lavoro separati e sono scambiate di continuo. Un processo che, afferma Robertson, sfocia in «una soluzione imperfetta sia sul versante aerodinamico sia su quello strutturale».

Dolcemente in volo. Atlas decolla per il suo volo vittorioso del 2013, con i quattro rotori che fendono l'aria in uno stadio di calcio coperto. Pedalando con forza, Reichert, sospeso sopra le pale, ha mantenuto il velivolo alto e stabile per oltre un minuto.

Per affrontare le varie questioni era indispensabile un programma che combinasse simultaneamente gli elementi strutturali e aerodinamici dei parametri progettuali concepiti per particolari elicotteri a propulsione umana. Il programma doveva anche funzionare a basso costo, e velocemente.

Oltre due vincoli

In cinque frenetici mesi di scrittura e riscrittura di codici, i due ingegneri hanno prodotto un programma per il loro portatile attingendo, in parte, al lavoro di Reichert sull'ornitottero effettuato in precedenza per il PhD. Per passare da un costoso supercalcolatore a un computer portatile hanno deciso, per esempio nel calcolo del flusso dell'aria attorno ai rotori, di sacrificare la costruzione di modelli ad alta fedeltà e di accontentarsi di quelli a media fedeltà. L'alta fedeltà è necessaria per descrivere con precisione dettagliata ciò che avviene in prossimità di aerodinamiche molto complesse, come in cima al rotore: è indispensabile per la progettazione di aerei di linea, ma non per Atlas, più basso, più lento e più facile da modificare. «La media fedeltà ti permette sempre di ottenere, diciamo, una risposta con un margine di errore del 2 per cento – spiega Robertson – ed era esattamente quello che cercavamo».

Il programma personalizzato consentiva loro di controllare sul portatile quasi ogni progetto elicotteristico. Bastava inserire le decine di variabili relative a un determinato progetto, per esempio geometria e peso del rotore, dimensioni e modalità di guasto dei materiali di costruzione, per esempio i tubi in fibra di carbonio: il programma elaborava i dati e in pochi minuti forniva la versione ottimale del velivolo, insieme alla quantità minima di potenza necessaria per farlo volare. Il programma fa ora parte della libreria di programmi della NASA: l'agenzia spaziale degli Stati Uniti ha apprezzato la grande velocità con cui si avvicina alla risposta corretta.

La prima decisione di Reichert e Robertson è stata giocare d'attacco: hanno costruito rotori con bracci lunghissimi e pale di dimensioni molto grandi, per dare al mezzo la massima capacità di sollevamento. Osservando il video del volo vittorioso si può avere l'impressione che i rotori di Atlas, con sole dieci rivoluzioni al minuto, siano troppo lenti per funzionare. Ma è la dimensione, non la velocità, a dotarli della spinta necessaria a sollevare la macchina da terra. I due ingegneri avevano intuito che gli insuccessi precedenti erano dovuti agli artificiosi limiti dimensionali imposti agli elicotteri e ai rotori per adattarli a luoghi come le palestre, per evitare ogni minimo refolo di vento che, all'esterno, avrebbe potuto metterne a repentaglio la prestazione. Era giusto stare all'interno – ammettevano i due scienziati – ma le palestre erano ambienti troppo ristretti. Così un vecchio edificio agricolo a nord di Toronto – e, in seguito, il campo da calcio fuori città – è diventato la Kitty Hawk del volo a propulsione umana.

L'altro vincolo fondamentale del progetto di Atlas riguardava peso e potenza del motore, ovvero di Reichert: un uomo di 1,80 di altezza e 82 chilogrammi di peso. Il progetto limitava il peso del pilota a 75 chilogrammi, il che significava che Reichert doveva dimagrire. Inoltre durante il volo avrebbe dovuto produrre un'energia sufficiente a sollevare se stesso e i 55 chilogrammi del velivolo

Cortesia di Martin Turner/Visiblize.com

1

– per un totale di 130 chilogrammi – fino a raggiungere i tre metri di altezza fissati, rimanendo lassù per 60 secondi. Gli obiettivi di potenza da raggiungere, che secondo le stime corrispondevano a una funzione del peso totale del velivolo e della dimensione dei quattro rotori, corrispondevano a un picco iniziale di 1000 watt seguito da un'erogazione regolare di 600 watt per il resto del volo. Sostanzialmente serviva uno scatto da centometrista seguito dal passo di un quattrocentometrista.

Ingegnere aeronautico forse tra i più atletici del Nord America, Reichert è stato impegnato ai più alti livelli agonistici canadesi del pattinaggio di velocità. Come parte di una macchina era, al pari del collega, ossessionato dalle misurazioni. «Se riesci a misurare qualcosa – afferma – riesci anche a migliorarlo». Durante i mesi di allenamento, lui e Robertson hanno usato due sistemi ergometrici per misurare l'energia prodotta. Reichert ha dato un valido contributo raggiungendo un peso di 72,5 chilogrammi, oltre due sotto il necessario, riducendo la quantità di energia richiesta per far volare l'elicottero senza significative perdite di energia del motore.

Per garantirsi i risultati migliori gli atleti regolano di solito il proprio allenamento in modo da raggiungere i picchi di forma fisica appena prima della gara. Ripetuti ritardi tecnici avevano invece costretto Reichert a mantenere il massimo della forza e della forma fisica per oltre nove mesi. Incredibilmente, durante il volo da record l'ingegnere alla fine aveva superato gli obiettivi, generando 1100 watt (quasi 1,5 cavalli vapore) durante i primi 12 secondi, per poi mantenere una media di 690 watt per tutti i 64 secondi in cui il velivolo era rimasto in aria.

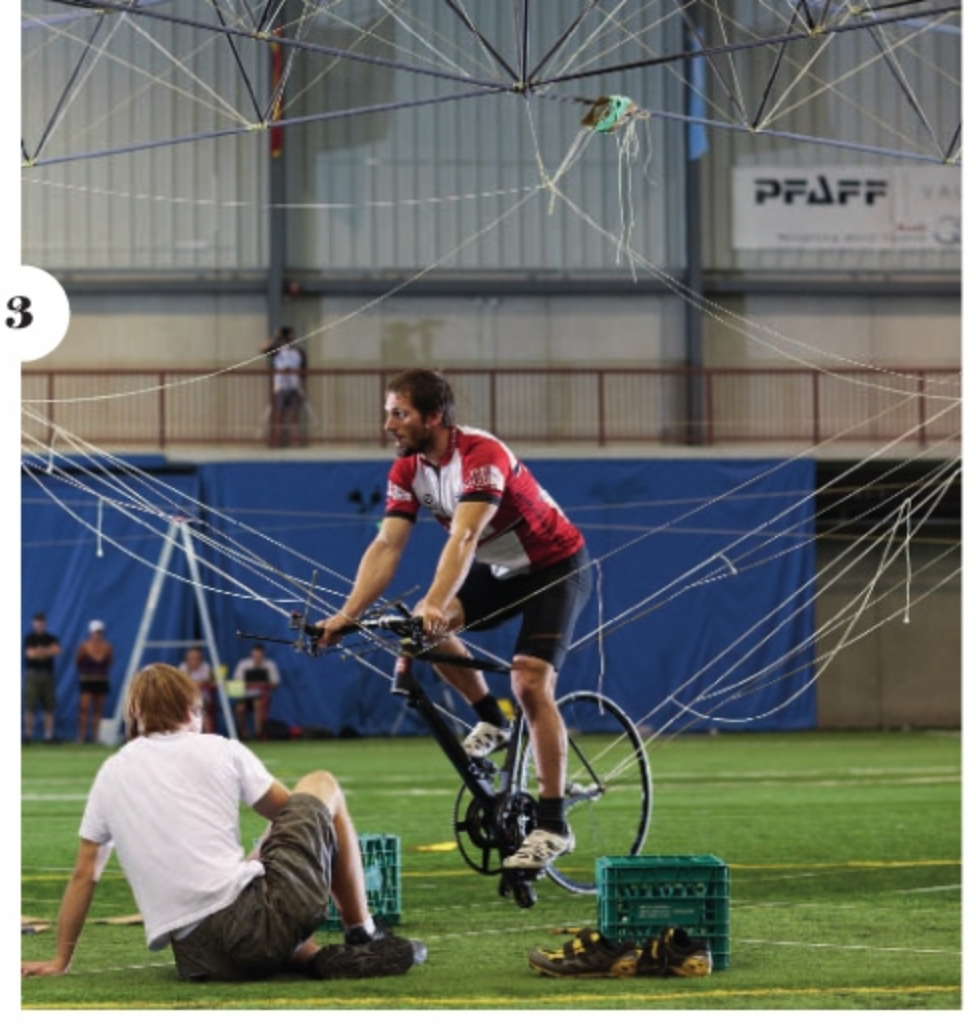
Reichert e Robertson hanno costruito Atlas durante l'estate 2012, insieme alla loro squadra di otto studenti dell'Università di Toronto. Anche se dovevano costruire un macchina gigantesca per raggiungere un traguardo «impossibile», i due non hanno sprecato tempo e denaro in sforzi inutili e materiali inusuali. Dove possibile hanno adottato soluzioni preesistenti, usando elementi di uso immediato (*plug and play*) già testati, per mantenere i costi bassi e potersi concentrare sui problemi più rilevanti. Invece di fabbricare una bicicletta speciale, superleggera per esempio, hanno modificato una normale Cervélo R5ca, fra le bici da strada più leggere prodotte al mondo. Come Robertson ama ripetere agli studenti che incontra, gran parte dei materiali usati per costruire Atlas si trovano nei negozi di *bricolage*. Il prodotto più nuovo era Vectran, una fibra polimerica a cristalli liquidi altamente tecnologica con una resistenza straordinaria e assolutamente indeformabile: una volta caricata, non si distende.

2

Nel capannone a nord di Toronto, spiega Reichert, la matematica complessa con i suoi freddi algoritmi aveva lasciato il posto a intuizioni e procedimenti condotti per tentativi ed errori. Una prima vittima del nuovo metodo era stato il sistema di controllo di Atlas, un complicato meccanismo di leve e cavi connessi a piccole superfici aerodinamiche a forma di L (chiamate *canards*) sulla sommità dei rotori. Dovevano evitare, modificando il passo dell'elica, che l'elicottero uscisse dalla superficie di dieci metri quadri fissato dalle regole del Sikorsky Prize.

Ma se lo scarto temporale fra l'azione del pilota e il risultato era troppo grande, il bizzarro sistema di controllo non funzionava. «Era perfetto dal punto di vista meccanico – spiega Robertson - ma non riusciva a impedire la deriva». È stato quindi sostituito da un sistema più semplice, che deviava qualche cavo per collegare la base della bici agli assali dei quattro rotori. Il pilota controllava la deriva inclinandosi in avanti quando voleva procedere in avanti, a sinistra quando voleva procedere verso sinistra e così via. «Ancora non posso crederci che funzionasse», commenta Reichert, e in un video della vittoriosa impresa lo si vede pedalare fortemente inclinato verso destra per quasi tutto il volo. Il siste-

Reed Young



3

4

Come funziona Atlas. L'intero velivolo, quando è a terra, somiglia a una grande X con un rotore all'estremità di ogni angolo (**1**). Le pale del rotore, in leggera pellicola Mylar, permettono al velivolo di sollevarsi (**2**). Reichert pedala una bicicletta le cui ruote muovono i cavi che fanno girare le eliche (**3**). Sotto ciascun rotore, intrecci di Kevlar giallo e fibra di carbonio funzionano come bobine per avvolgere i cavi (**4**).

ma non solo facilitava le azioni di manovra di Atlas, ma ne riduceva il peso totale del 10 per cento. Grazie anche alla diminuzione dell'attrito, è stato possibile ridurre l'energia necessaria addirittura del 20 per cento.

Durante le fasi di collaudo si sono verificati diversi incidenti, tra cui due impressionanti collisioni a poche settimane dal volo finale. Entrambe erano state provocate da un fenomeno aerodinamico noto come «anello vorticoso», che si verifica quando le eliche rotanti «navigano nel vuoto» scavando nell'aria già sospinta in avanti e il mezzo perde quota. Osservando da vicino i rotori, i due ingegneri avevano notato che le superfici d'attacco non erano abbastanza lisce: la pellicola Mylar, applicata velocemente nella fretta di completare il velivolo, aveva punti più ruvidi che aumentavano eccessivamente l'attrito. I due l'hanno quindi levigata attentamente, e hanno anche accorciato gli assali in fibra di carbonio irrigidendo il sistema di cavi sui bracci dei rotori.

Le modifiche hanno funzionato. Otto settimane dopo la seconda collisione Reichert e Robertson hanno vinto il Sikorsky Prize. Il video del volo, in cui si vede Reichert guidare inclinato di traverso una specie di strampalata gru corredata di quattro gigantesche coppie di eliche, ha avuto oltre 3 milioni di visite su YouTube. Obiettivo della competizione era ispirare la nuova generazione di ingegneri e catturare l'immaginazione del pubblico, e in base agli indicatori di YouTube il volo di Atlas può considerarsi riuscito.

Ambizione motivante

Dopo la vittoriosa impresa, ogni membro del gruppo ha avuto la possibilità di compiere un volo su Atlas, che si è sollevato ogni volta fra 30 e 60 centimetri da terra. «Prima di quel giorno – commenta Robertson – erano più le persone che avevano camminato sulla superficie della Luna rispetto a quelle che avevano manovrato un elicottero a propulsione umana. Abbiamo raddoppiato la cifra».

Quando Reichert parla delle ragioni del successo di Atlas, va oltre la tecnologia. Descrive la loro determinazione a fare l'impossibile, o almeno a provarci. «Bisogna fissare traguardi ambiziosi – dice – perché riescono a motivare le persone».

Gli obiettivi che ci circondano sono sempre troppo modesti, denuncia Robertson, citando soprattutto le norme sui consumi di carburante. Secondo lui gli ammirevoli sforzi governativi per ridurre i consumi delle auto statunitensi, come il limite massimo di 23,17 chilometri al litro (54,5 miglia con un gallone) da raggiungere entro il 2025, con un miglioramento dell'88 per cento rispetto ai livelli attuali, non sono abbastanza ambiziosi. «Se il governo imponesse invece un incremento del 1000 per cento nell'efficienza energetica – aggiunge – tutti sarebbero costretti a fermarsi e considerare il problema da un altro punto di vista». E questo, conclude, potrebbe inaugurare una nuova era di trasporto superefficiente.

Lo stesso vale per la politica. Reichert e Robertson sperano che obiettivi più elevati incoraggino un nuovo modo di considerare problemi apparentemente irrisolvibili. «Sfidare l'impossibile non è necessariamente più facile – sostiene Reichert – ma è più soddisfacente, più stimolante e, alla fine, più importante».

Quest'anno i due torneranno al volo per vincere un'ulteriore sfida della propulsione umana, da decenni senza un vincitore: il Kremer Prize, 50.000 sterline a chi copre una distanza di 42,195 chilometri nell'arco di un'ora o meno. Reichert e Robertson stanno già valutandone vincoli e condizioni, e sono certi di poter aggiungere il premio alla lista delle loro improbabili vittorie.

Poiché l'unico velivolo a propulsione umana avvicinatosi alla velocità richiesta è rimasto in aria per meno di tre minuti, si potrebbe concludere che i requisiti del premio «non sono realisticamente raggiungibili». Ma è esattamente quello che Reichert e Robertson desiderano sentirsi dire. ■

PER APPROFONDIRE

Progress in Human Powered Aircraft Research and Achievement. Proceedings of the Human-Powered Aircraft Group Half Day Conference, Royal Aeronautical Society, 21 gennaio 1993.

On the Possibility of Human-Powered Vertical Flight. Filippone A., in «Journal of the American Helicopter Society», Vol. 52, n. 4, pp. 371-381, 1° ottobre 2007.

Il volo a propulsione umana. Drela M. e Langford J.S., in «Le Scienze» n. 209, gennaio 1986.

Oggi la ricerca prende in prestito strumenti tipici della medicina e dell'economia per capire quali sono i metodi di insegnamento più efficaci. Purtroppo, però, i risultati ottenuti non arrivano fino alle aule

Fredrik Broden (*fotografia*); Julie Whitmire (*elaborazione grafica*)

Anna Fisher stava tenendo un seminario sul tema dell'attenzione e la distrazione nei bambini quando notò che le pareti dell'aula in cui era, alla Carnegie Mellon University, erano completamente spoglie. Pensò immediatamente agli asili, dove ogni stanza è decorata con poster, mappe colorate e disegni, e si chiese che effetto potesse avere tanta stimolazione visiva sui bambini, considerando la loro limitata capacità di concentrazione. Allestire l'ambiente in un certo modo può influire sulle capacità di apprendimento dei più piccoli?

IN BREVE

Negli Stati Uniti sono in corso centinaia di esperimenti per introdurre metodi più rigorosamente scientifici nelle scuole statunitensi, un'ondata di ricerche nate con il No Child Left Behind Act di Bush, che oggi continuano sotto il presidente Obama.

I ricercatori usano tecnologie innovative e nuovi metodi per condurre studi che sarebbero stati impensabili anche solo dieci anni fa.

I risultati mettono in discussione idee affermate da tempo: per esempio che il miglior modo per selezionare gli insegnanti sia sulla base dei titoli di studio, che il numero di studenti per classe sia determinante o che i ragazzi abbiano bisogno di spiegazioni dettagliate per imparare qualcosa.

Barbara Kantrowitz è redattore anziano presso Hechinger Report, un'agenzia di stampa senza scopo di lucro specializzata nel campo della formazione. Insegna alla Columbia Journalism School ed è stata redattrice e giornalista per «Newsweek» per oltre vent'anni.

INSEGNARE LA SCIENZA

Perché non impariamo la lezione

A livello universitario, le prove sono chiare: chi studia materie scientifiche impara meno se è costretto ad ascoltare passivamente

di Carl Wieman

All'università i professori di scienze predicano che la verità va cercata attraverso i dati e gli esperimenti rigorosi, ma appena mettono piede in aula usano metodi obsoleti e poco efficaci. La stragrande maggioranza dei corsi universitari di scienze è tenuta da docenti che si limitano a illustrare un argomento a voce, a dispetto delle centinaia di studi che dimostrano come vari approcci alternativi permettano agli studenti di apprendere molto di più, riducendo il tasso di bocciature.

Questi nuovi metodi sono stati battezzati in vari modi, ma vengono generalmente compresi sotto il nome di «apprendimento attivo». La loro caratteristica comune è che gli studenti, invece di ascoltare passivamente, passano le lezioni rispondendo a domande, risolvendo problemi, discutendo soluzioni con i compagni e ragionando sul materiale che stanno studiando, mentre l'insegnante segue e orienta il dibattito in un dialogo continuo. Uno studio condotto nel 2012 dalla National Academy of Sciences e una dettagliata review pubblicata lo scorso maggio sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» confermano che questo approccio migliora l'apprendimento di tutte le discipline scientifiche e tecniche, sia nei corsi di base sia in quelli avanzati (*si veda il grafico nella pagina a fronte*).

L'apprendimento attivo può essere messo in pratica in molti modi diversi. Nelle classi più piccole, spesso gli studenti formano gruppi, ciascuno dei quali risolve un passaggio di un problema più ampio. Nei corsi seguiPer scoprirlo, Karrie Godwin, collaboratrice della Fisher, ha condotto uno studio presso la Children's School, l'asilo sperimentale della Carnegie Mellon University. Due gruppi di bambini hanno ascoltato tre storie di scienza in una stanza decorata allegramente oppure spoglia. I ricercatori hanno poi posto loro alcune domande su quanto avevano appena ascoltato. I bambini nell'aula spoglia erano stati più attenti, e avevano ottenuto punteggi più alti nei test di comprensione.

Le centinaia di esperimenti simili attualmente in corso sono parte di uno sforzo per introdurre metodi più scientifici nelle scuole statunitensi iniziato con l'approvazione del *No Child Left Behind Act* durante la presidenza di George W. Bush e che continua tuttora. Nel 2002 il Department of Education ha creato l'Institute of Education Sciences (IES), per incoraggiare quella che definisce «ricerca scientificamente valida»; in particolare studi controllati randomizzati, che i sostenitori dello IES considerano il metodo migliore.

Oggi i ricercatori usano tecnologie d'avanguardia e nuovi metodi di analisi dei dati per progettare esperimenti impensabili anche solo dieci anni fa. Videocamere seguono i movimenti oculari degli studenti per vedere su che cosa è diretta la loro attenzione; sensori cutanei rivelano se si annoiano o sono interessati. E gli economisti hanno scoperto come elaborare i dati per simulare gli studi randomizzati, spesso troppo difficili e costosi da condurre nelle scuole.

Buona parte dei nuovi studi va oltre le metriche dei test standard: oggi si cerca di cogliere l'apprendimento nel suo divenire. «Mi interessa misurare ciò che conta davvero», dice Paulo Blikstein, della Stanford Graduate School of Education. «Stiamo sviluppando nuove tecnologie e nuovi metodi di raccolta dati proprio per cogliere il processo». La qualità delle prestazioni degli studenti è solo una parte dell'esperimento; i ricercatori registrano anche lo sguardo dei ragazzi, la loro risposta galvanica cutanea e gli scambi con i compagni. Blikstein definisce questo approccio «analisi statistica multimodale dell'apprendimento».

Questo nuovo approccio sta già mettendo in discussione alcuni principi assodati, scoprendo che gli insegnanti non andrebbero valutati dai loro titoli di studio, che il numero di studenti per classe non è sempre determinante e che i ragazzi potrebbero essere più stimolati se devono fare un po' di fatica per finire un compito. Anche se questi studi non hanno ancora trovato la panacea per tutti i mali del sistema scolastico, i risultati stanno iniziando a individuare alcune tessere del complicato puzzle che chiamiamo istruzione.

Alla ricerca di uno schema

Come spesso accade, gli studi più provocatori ottengono i risultati più sorprendenti. Blikstein ha condotto una serie di esperimenti sugli studenti delle scuole medie e superiori per capire quali sono le modalità migliori per insegnare matematica e scienze, una volta esclusi strumenti relativamente primitivi come i test a risposta multipla. «Il fallimento è un elemento fondamentale della tecnica e della scienza», dice. «Provi qualcosa, non funziona, correggi la tua idea iniziale e riprovi da un nuovo punto di partenza»: questo è il tipo di processo che spera di ricreare anche in aula attraverso nuovi strumenti. Nei suoi esperimenti porta i ragazzi in laboratorio e chiede loro di lavorare a un certo progetto di argomento tecnico o scientifico, mentre vari sensori raccolgono dati che i ricercatori analizzano alla ricerca di uno schema generale. «Ci sono molti aspetti controintuitivi nel modo in cui noi esseri umani impariamo qualcosa di nuovo», nota Blikstein. «Per esempio ci piace scoprire che un'idea che abbiamo avuto a volte è sbagliata».

Ultimamente è alla ribalta il *problem-based learning* (o *discovery learning*), in cui gli studenti scoprono i fatti da soli anziché riceverli da un docente. Blikstein e colleghi alla FabLab@School, un network di laboratori formativi che ha fondato nel 2009, stanno cercando di capire qual è il livello minimo di istruzioni di cui hanno bisogno i ragazzi. Ai genitori può non piacere che i figli si sentano frustrati a scuola, ma secondo Blikstein «una certa dose di frustrazione e fallimento può rivelarsi estremamente produttiva e diventare un'ottima leva per l'apprendimento». Per questo ha condotto una serie di studi per determinare se gli studenti capiscano meglio un argomento scientifico dopo una lezione o attraver-

ti da 100-300 persone, spesso i docenti usano dei *clicker*, pulsantiere individuali che consentono agli studenti di trasmettere istantaneamente la loro risposta all'insegnante senza muoversi dal loro posto: questo permette a chi spiega può vedere subito quanti dei presenti stanno comprendendo la lezione. Le domande più efficaci in questo metodo sono quelle che stimolano gli studenti a pensare, perché richiedono la comprensione e l'uso di concetti fondamentali anziché la semplice memorizzazione. Quando la maggior parte della classe dà una risposta sbagliata, l'insegnante chiede agli studenti di confrontarsi con i vicini di banco e riprovare; nel frattempo ascolta, interviene nelle discussioni che nascono e offre qualche suggerimento mirato.

In tutte queste situazioni il professore passa comunque molto tempo a parlare, ma ad ascoltarlo ci sono studenti predisposti a imparare, che capiscono perché l'argomento è interessante e come possono usare nuove nozioni per risolvere un problema. L'argomento di studio, contestualizzato, acquista significato e non sembra più un insieme di fatti irrilevanti e procedure da memorizzare senza capirne nulla.

Per quanto riguarda gli anni che vanno dalla scuola materna alle medie inferiori [*quello che negli Stati Uniti va sotto il nome «K-12», cioè dal kindergarten alla «dodicesima» classe, N.d.T.*], la ricerca sull'efficacia dell'apprendimento attivo ha dato risultati meno chiari, perché è più difficile condurre ricerca in questo ambito, visto il gran numero di elementi che sfugge al controllo dei ricercatori. La variabile più importante forse è il livello di competenza dei docenti nelle materie che insegnano, che è disomogeneo e spesso troppo basso. Dato che l'apprendimento attivo richiede pratica e capacità di pensare come un esperto (uno scienziato), esige una conoscenza notevolmente più elevata delle materie da parte di chi insegna. I docenti universitari soddisfano questo requisito senza alcun problema e la popolazione studentesca è più omogenea.

Sfortunatamente, purtroppo il basso livello di competenza degli insegnanti di scienze dei livelli K-12 resterà un problema fino a quando i corsi di scienze all'università non miglioreranno abbastanza da garantire che tutti gli studenti, inclusi i futuri insegnanti K-12, arrivino alla laurea con una solida comprensione della scienza e un modello di insegnamento più efficace. Con così tante prove scientifiche a favore dell'apprendimento attivo, viene spontaneo chiedersi perché questi metodi siano messi in pratica così di rado nei college e nelle università statunitensi.

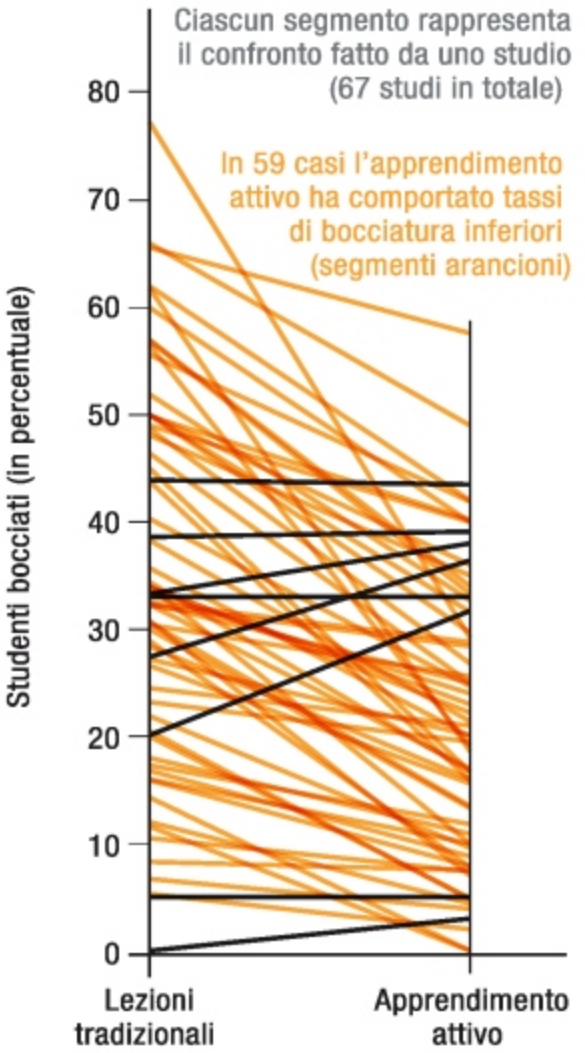
In parte lo si deve alla semplice abitudine. Le classiche lezioni in cui il professore spiega e gli studenti prendono appunti nascono dal fatto che all'inizio i libri di testo non esistevano, e non si poteva fare altro che dettare e scrivere: è come se i metodi di insegnamento non si fossero ancora adattati all'invenzione della stampa.

Una seconda ragione è legata a un'idea fondamentalmente sbagliata dell'apprendimento. La maggior parte delle persone, compresi i docenti universitari e i responsabili degli atenei, sono convinte che per imparare qualcosa basti ascoltare un insegnante che parla. In realtà questo è vero solo se si tratta di imparare qualcosa di molto semplice, come «è meglio mangiare un frutto maturo che uno acerbo». Concetti più complessi, incluse le fondamenta del pensiero scientifico, richiedono invece il tipo di pratica e interazione che abbiamo descritto negli esempi prima, in modo che il cervello possa generare i nuovi percorsi neuronali necessari per le capacità acquisite.

Il motivo principale per cui l'istruzione superiore non cambia, però, è che manca un incentivo a farlo. Professori e università ottengono riconoscimenti e premi solo in base a quanto sono bravi ad attirare i fondi stanziati per la ricerca a livello federale (40 miliardi di dollari all'anno). Non vengono incoraggiati in alcun modo a fare lo sforzo di passare dai metodi pedagogici più pedanti a quelli di efficacia dimostrata: in effetti, negli Stati Uniti non c'è quasi nessuna università in cui venga monitorato il metodo di insegnamento usato in aula. Fino a quando la situazione rimane questa, chi vuole iscriversi all'università non ha alcun modo per confrontare la qualità dell'istruzione che riceverà nelle diverse istituzioni, e quindi nessun ateneo è spinto a migliorarsi.

Carl Wieman, premio Nobel per la fisica nel 2001, ha una doppia cattedra presso il Dipartimento di fisica e la Graduate School of Education della Stanford University.

Secondo quanto riferisce una review pubblicata sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» lo scorso mese di maggio, gli studenti iscritti a corsi di scienze tenuti attraverso lezioni tradizionali hanno maggiori probabilità di essere bocciati rispetto a quelli iscritti a corsi che sfruttano tecniche di apprendimento attivo, una definizione che comprende le attività di problem solving in gruppo e il feedback regolare da parte dell'insegnante.



Fonte: «Active Learning Increases Student Performance In Science, Engineering, And Mathematics» di Scott Freeman et al., supplemento a *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*; 12 maggio 2014.

so un'attività. Ha diviso i partecipanti in due gruppi: il primo ha ascoltato la lezione, e il secondo ha iniziato dall'attività. L'esperimento è stato ripetuto più volte, con risultati abbastanza costanti: la performance del secondo gruppo era del 25 per cento superiore rispetto al primo. «Se ascolti qualcuno che parla, senza aver prima affrontato il problema da solo almeno un po', hai le risposte senza sapere quali sono le domande», spiega Blikstein.

Parte dei progressi della ricerca sui processi di apprendimento è dovuta a nuovi strumenti e metodi di analisi dei dati. Jordan Matsudaira, della Cornell University, ha riesumato uno strumento di ricerca economica per analizzare l'efficacia dei corsi estivi e quella dei finanziamenti erogati da un programma federale mirato alle scuole che hanno una certa percentuale di studenti a basso reddito. Si tratta dell'analisi di regressione-discontinuità, che ha permesso a Matsudaira di mettere a confronto gruppi di studenti con risultati ai due lati di una certa soglia. Per esempio, nello studio sui corsi estivi ha confrontato gli studenti che avevano ottenuto un punteggio appena superiore al livello di ammissione con quelli il cui punteggio era appena inferiore, per capire se le lezioni supplementari ricevute durante le vacanze portavano a risultati migliori. Ha simulato uno studio controllato randomizzato e ha concluso che offrire più corsi estivi sarebbe un modo più economico rispetto a ridurre il numero di alunni per classe.

Nella sua ricerca sugli effetti del programma, invece, Matsudai-

ra ha messo a confronto scuole appena sopra e appena sotto il livello richiesto per ricevere i finanziamenti. Pur notando che i fondi aggiuntivi non hanno avuto un effetto rilevante sulla performance degli studenti, Matsudaira ha ammesso alcuni limiti nell'impostazione del suo studio. È possibile, infatti, che le scuole con una quota di studenti poveri molto superiore alla soglia si avvantaggino di più dei fondi ricevuti, anche perché si può immaginare che le scuole vicine alla soglia usino il finanziamento per spese *una tantum* invece che per investimenti di lungo periodo, perché sanno che con una minima variazione della popolazione studentesca possono perdere il diritto al finanziamento federale l'anno dopo.

Anche le tecniche di data mining si stanno rivelando utili. Ryan Baker, della Columbia University, presidente della International Educational Data Mining Society, ricorda che quando studiava per il dottorato nei primi anni 2000 si svegliava ogni mattina alle sei per arrivare in tempo a una scuola diversa, dove passava il giorno a prendere appunti su una cartellina. Dieci anni dopo, la sua routine quotidiana è molto diversa: lui e i suoi colleghi hanno appena concluso uno studio longitudinale finanziato dalla National Science Foundation consultando i dati registrati in sette anni da migliaia di studenti delle medie attraverso un software di tutoraggio online sulla matematica. I ricercatori hanno scoperto se gli studenti coinvolti sono andati all'università, quanto era selettivo l'istituto dove sono stati ammessi e in quali discipline si sono laureati: tutto per cercare un eventuale collegamento tra l'uso del software e i risultati accademici successivi.

«Grazie ai *big data* possiamo analizzare lunghi periodi di tempo nei minimi dettagli», dice Baker. Lui e i suoi colleghi erano interessati a capire che ne era stato degli studenti che avevano imbrogliato il sistema, risolvendo una serie di problemi senza seguire tutti i passaggi. «Il fatto che uno studente abbia o meno usato intenzionalmente male un software per finire un esercizio permette di prevedere se andrà all'università con più accuratezza di fattori come il tasso di presenze a lezione», spiega. Inoltre pare che barare sugli esercizi più semplici sia meno nocivo che barare su quelli più difficili. Gli studenti che hanno aggirato le domande più semplici forse erano solo annoiati, mentre quelli che hanno fatto in modo di saltare i quesiti più difficili potevano non aver capito la materia. Baker crede che questo tipo di informazioni possa aiutare a capire non solo quali studenti rischiano di avere problemi, ma anche perché siano a rischio e che cosa si possa fare per aiutarli.

Vogliamo le prove

Tutti questi nuovi studi contribuiscono a formare un patrimonio di conoscenze scientifiche che manca da tempo. Grover Whitehurst ricorda che nel 2002, quando assunse il ruolo di direttore dello IES, il funzionario scolastico di un distretto dominato da minoranze gli chiese di suggerirgli un programma di matematica di efficacia dimostrata. «Gli risposi che non esisteva, e lui rimase di stucco all'idea che una legge poteva costringerlo a basare il suo lavoro sulle prove scientifiche, che la ricerca ancora non aveva fornito». Whitehurst, che ora è direttore del Brown Center on Education Policy e senior fellow al Brookings Institution, aggiunge che «al tempo venivano sviluppati pochissimi studi per aiutare politici e insegnanti a fare il loro lavoro. Al massimo c'erano ricercatori, docenti universitari o istituti di scienze della formazione che pubblicavano documenti per altri ricercatori, docenti o istituti».

Le critiche hanno spinto la scuola a esaminare e spiegare i propri metodi e obiettivi. Nei primi anni di attività dello IES, Whitehurst e altri suoi colleghi paragonavano spesso le scienze della formazione agli studi sui farmaci, chiedendo che prassi e nuovi programmi fossero testati con la stessa accuratezza adottata nella sperimentazione di un nuovo medicinale. Solo ciò che veniva «promosso» andava inserito nella What Works Clearinghouse, la banca dati a disposizione degli insegnanti che raccoglie i risultati raggiunti finora dagli studi sui metodi educativi.

John Easton, attuale direttore dello IES, è convinto che la naca dati sia particolarmente utile per selezionare i prodotti: «Credo che sia una fonte di grande valore, affidabile, dove si può scoprire se ci sono prove concrete che un determinato prodotto commerciale funziona davvero», dice. Oggi la What Works Clearinghouse contiene oltre 500 sintesi dei risultati di studi su temi che vanno dalla matematica per bambini alla scrittura per le elementari all'aiuto per le domande di ammissione al college. Per distinguere la qualità degli studi ci sono anche centinaia di migliaia di recensioni.

Secondo Whitehurst, uno degli effetti più importanti che ha avuto l'attenzione del governo per la «scientificità» della scuola è stato un netto cambiamento nella definizione di «insegnante di alto livello». In passato ci si affidava ai titoli di studio e specializzazione; oggi invece «si valuta in base all'efficacia in aula, misurata attraverso le osservazioni e la sua capacità di migliorare i voti dei suoi studenti». Benché esistano ancora notevoli discussioni su come valutare l'efficacia di un singolo docente, secondo Whitehurst questo cambiamento nell'approccio è stato prodotto dalla comunità scientifica, e soprattutto dagli economisti «che si sono interessati al tema perché improvvisamente hanno avuto a disposizione tutti i dati e gli strumenti di cui avevano bisogno».

Molti ricercatori si sono lamentati che lo IES favorisce gli studi controllati randomizzati al punto di escludere altre metodologie potenzialmente utili. I casi di studio su specifici distretti scolastici, per esempio, potrebbero dare un'utile descrizione di come entrano in azione determinate pratiche. «Esiste un vero e proprio ecosistema di metodologie, il che ha perfettamente senso vista la complessità del fenomeno "formazione"... e uso il termine "complessità" nel suo significato scientifico», dice Anthony Kelly, professore di psicologia della formazione alla George Mason University. Easton è convinto che gli studi controllati randomizzati siano una parte importante del processo, ma non ne sono necessariamente il punto culminante: secondo lui potrebbero rivelarsi utili anche in una fase iniziale, in cui si sviluppa un esperimento per capire se una determinata soluzione funziona e merita un approfondimento.

Dal laboratorio all'aula

La vera sfida è far arrivare queste nuove prove scientifiche alle scuole. «Il problema della ricerca nel campo della formazione, come in molti altri campi, è che solitamente bisogna pensare al lungo periodo», dice Joan Ferrini-Mundy, vicedirettore del Directorate for Education and Human Resources della National Science Foundation. «Sarà difficile che un unico studio di breve periodo abbia impatto». Inoltre, tra laboratorio e scuola da molto tempo esiste un muro: fino a poco tempo fa ai ricercatori non importava se o come le loro scoperte venivano applicate nel mondo reale perché non lo consideravano parte del loro lavoro; allo stesso tempo, buona parte degli insegnanti era convinta che la loro esperienza in aula superasse qualsiasi novità potessero tirare fuori gli scienziati.

La What Works Clearinghouse avrebbe dovuto aiutare a buttare giù quel muro. Ma nel 2010 il General Accountability Office ha rilevato che appena il 42 per cento delle scuole intervistate aveva mai sentito parlare dell'iniziativa, che solo il 34 per cento circa dei distretti scolastici aveva visitato il sito della What Works Cle-

aringhouse almeno una volta, e molti di meno quelli che lo consultavano con una certa frequenza. In un rapporto aggiornato nel dicembre 2013, l'ente ha quindi concluso che la diffusione dei risultati della ricerca rimane un problema. Un problema che oggi è più urgente che mai, con l'adozione degli standard Common Core [*con i quali i diversi Stati hanno definito ciò che gli studenti dovrebbero sapere alla fine di ogni anno scolastico fino alle medie inferiori, N.d.T.*]. Mentre gli editori promuovono con forza prodotti che dicono in linea con i nuovi requisiti, i responsabili degli acquisti nei vari distretti scolastici non hanno la possibilità di fare una ricerca sulle soluzioni la cui efficacia rispetto ai Common Core è dimostrata: devono cercare uno per uno nella What Works Clearinghouse gli studi relativi ai prodotti che stanno prendendo in considerazione, sapendo che non tutti sono presenti.

Easton ammette che c'è bisogno di un sistema di comunicazione migliore per raggiungere le scuole. Per cercare di risolvere parte del problema, la What Works Clearinghouse ha pubblicato 18 «guide» che sintetizzano le conclusioni della ricerca su argomenti come l'insegnamento a studenti che stanno ancora imparando la lingua, o come spiegare la matematica ai più piccoli. Le guide sono curate da un comitato che comprende ricercatori, insegnanti e personale delle amministrazioni scolastiche, e secondo Sharon Carver – professoressa di psicologia, direttrice della Children's School della Carnegie Mellon e tra i primi membri del comitato di matematica – in futuro potrebbero essere utili anche per orientare i nuovi sforzi della ricerca: per questo la Carver incoraggia i suoi studenti a leggere le guide relative al loro campo d'interesse per individuare le aree che hanno bisogno di approfondimenti.

Ogni studio e ogni esperimento aggiunge una tessera a un puzzle davvero enorme. «Non credo che si possa analizzare la scuola pensando semplicemente se funziona o no, come se l'apprendimento fosse una lampadina da accendere», dice Joseph Merlino, presidente della 21st Century Partnership for STEM Education, un'organizzazione senza scopo di lucro di Philadelphia. «Non mi risulta che la conoscenza umana segua questo modello... Viviamo circondati dalla meccanica e ci siamo abituati a pensare in modo meccanico: funziona? Si può aggiustare? Ma secondo me "aggiustare" la scuola sarebbe come "aggiustare" una pianta di pomodoro. Piuttosto va coltivata, va curata».

L'organizzazione di Merlino ha condotto uno studio controllato randomizzato per valutare, nell'arco di cinque anni, l'efficacia di quattro principi base delle scienze cognitive nella loro applicazione all'insegnamento delle scienze ai ragazzi delle scuole medie. Delle 180 scuole coinvolte in Pennsylvania e in Arizona, alcune hanno ricevuto un programma modificato e altre uno non modificato. La prima parte dello studio riprendeva ciò che la ricerca nel campo delle scienze cognitive dice su come le persone imparano dai diagrammi. I risultati suggeriscono che alcuni espedienti grafici usati per rendere più interessanti questi schemi – per esempio l'aggiunta di molti colori – in realtà distraggono i ragazzi, e che gli studenti hanno bisogno di istruzioni per interpretare correttamente quello che vedono. Queste informazioni si potrebbero integrare nel progetto editoriale di un nuovo libro di testo, mentre gli insegnanti, da parte loro, dovrebbero trovare il tempo di spiegare che cosa significano i vari simboli di ogni diagramma, che si tratti di frecce o di stratigrafie.

Coinvolgere gli insegnanti nella ricerca potrebbe far finalmente arrivare i risultati raggiunti fino ai banchi di scuola. Spesso gli insegnanti hanno l'impressione che la loro esperienza venga del tutto ignorata: dopo qualche anno ricevono un nuovo programma che in teoria è basato sulle scoperte più recenti, ma che devono seguire senza chiedere troppe spiegazioni sul perché sia migliore di quelli vecchi.

In passato i ricercatori non erano abituati a pensare che spiegare il loro lavoro agli insegnanti fosse una loro responsabilità. Oggi le cose stanno cambiando: secondo Nora Newcombe, professoressa di psicologia alla Temple University e responsabile scientifico dello Spatial Intelligence and Learning Center, «la gente inizia davvero a rendersi conto che se riceve finanziamenti pubblici ha il dovere di condividere la sua conoscenza».

Lo scambio di conoscenze è una strada a doppio senso: quando gli insegnanti sono stati coinvolti nella progettazione degli esperimenti su un nuovo programma di scienze, «si sono dimostrati maestri eccezionali», dice la Newcombe. «Ci hanno insegnato molto, e ci hanno offerto molto feedback». Avendo condotto lo studio all'interno delle scuole, e non in laboratorio, i ricercatori hanno potuto formare gli insegnanti man mano che il progetto avanzava.

Spesso gli insegnanti hanno l'impressione che la loro esperienza sia del tutto ignorata, ma coinvolgerli nelle ricerche potrebbe farne arrivare i risultati fino ai banchi di scuola

Altri ricercatori fanno riferimento al modello adottato in Finlandia. Qui la teoria delle scienze della formazione, i metodi di ricerca e la pratica sono tre componenti inscindibili della preparazione di un insegnante, come spiega Pasi Sahlberg nel suo saggio del 2011 *Finnish Lessons*, su come il paese scandinavo ha ricostruito il proprio sistema educativo ed è arrivato a classificarsi ai primi posti al mondo per capacità matematiche e linguistiche. Forse non è corretto paragonare le scuole statunitensi a quelle finlandesi, perché la Finlandia è un paese più omogeneo degli Stati Uniti, ma la Newcombe rimane convinta che la formazione degli insegnanti americani dovrebbe tenere in considerazione gli ultimi sviluppi nel campo delle scienze cognitive. Secondo lei, molti programmi di formazione destinati agli insegnanti si attengono ancora alla «psicologia che è stata superata non dieci, ma quaranta anni fa».

Dare agli insegnanti fondamenta più solide potrebbe aiutarli a capire l'importanza dei nuovi risultati raggiunti dalla ricerca e a veicolarli nelle loro lezioni in aula. «Non si può scrivere un copione per ogni eventualità che si può verificare di fronte a una classe di studenti», dice la Newcombe. «Ma se abbiamo fatto nostri alcuni principi generali, utili ad affrontare le situazioni che possono presentarsi, possiamo fare meglio il nostro lavoro». ■

PER APPROFONDIRE

Active Learning Increases Student Performance in Science, Engineering and Math. Freeman S. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences». Pubblicato on line il 12 maggio 2014.

Visual Environment, Attention Allocation, and Learning in Young Children: When Too Much of a Good Thing May Be Bad. Fisher A.V. e altri, in «Psychological Science». Pubblicato on line il 21 maggio 2014.

Studiare nell'era digitale. Autori vari, in «Le Scienze» n. 242, ottobre 2013.

Ronan Stephan,
Responsabile Innovazione del Gruppo Alstom

Robert Plana,
Responsabile R&S e rapporti con le università del Gruppo Alstom

ENERGIA E TRASPORTI

Nuovi paradigmi nell'innovazione

di Roman Stephan e Robert Plana

Come molti campi della scienza, quelli legati alle questioni dell'energia e dei trasporti si intrecciano oggi con i movimenti globali legati all'urbanizzazione, al mutamento dei climi e alla rarefazione delle risorse fossili.

Questo intreccio di questioni planetarie richiede risposte sistemiche. Di conseguenza, la crescente produzione di energia da fonti rinnovabili richiede nuove soluzioni tanto per il trasporto e l'immagazzinamento quanto per il consumo dell'energia. Ciò significa architetture nuove e più complesse (reti a griglia intelligente, sistemi di mobilità multimodale, ecc.), e sistemi le cui prestazioni devono essere ottimizzate su scala globale e non più in termini di singolo componente, uno alla volta.

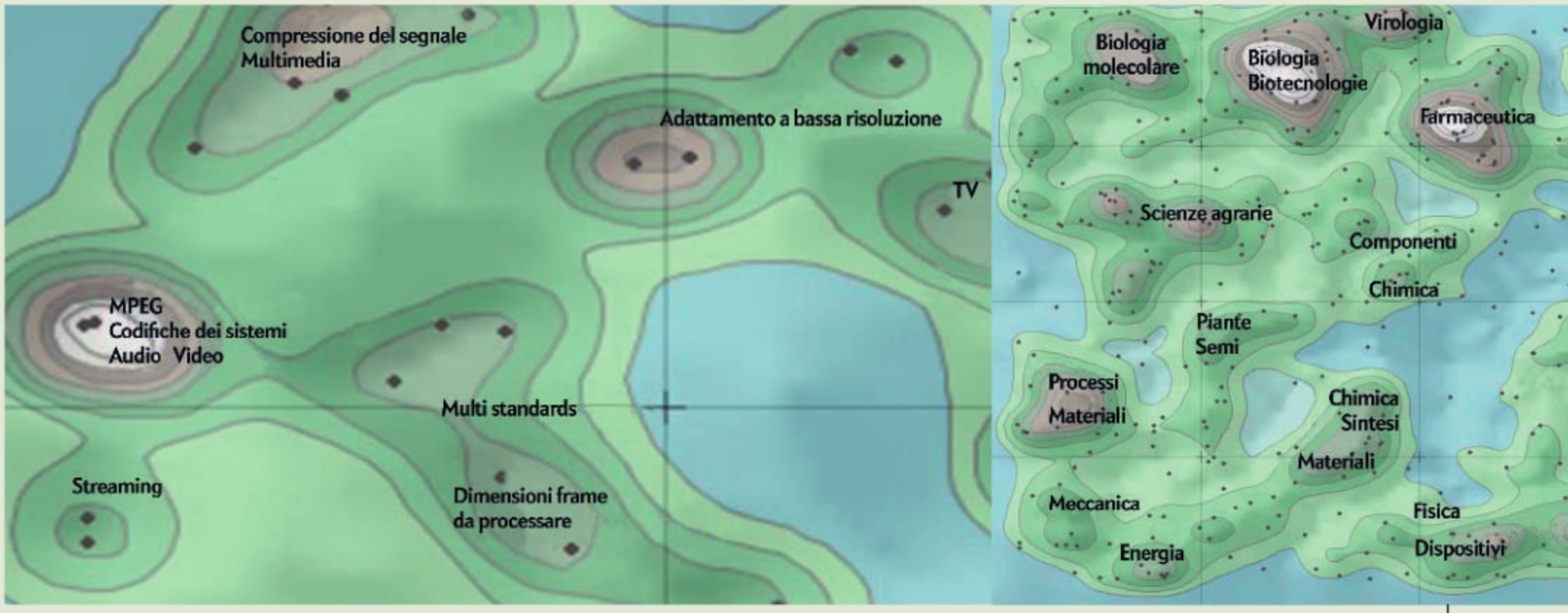
Questa nuova complessità può essere paragonata alle architetture osservate nel mondo vivente, e ispira analogie con la biologia, un campo in cui ogni cosa si basa su un equilibrio dinamico di sistemi.

Grazie ai lumi offerti da discipline diverse, queste nuove questioni scientifiche producono qua e là sprazzi di comprensione, che potrebbero condurre a nuove soluzioni di costruzione di modelli e previsione dei comportamenti di queste architetture. Saper individuare questi segni tenui e primitivi, nati da osservazioni paradossali che stimolano il pensiero e spingono gli individui ad agire in base a una semplice intuizione («Questo mi fa pensare a...»), è diventato vitale.

NUOVI PARADIGMI SOCIALI E COGNITIVI

Questa è la chiave per un ragionamento analogico che da un lato innescherà la comprensione – consentendoci quindi di padroneggiare le questioni – e dall'altro aprirà la strada per nuovi modi di fare le cose, che ci consentano di affrontare i problemi da nuove angolature. Per esempio, le conoscenze derivate dalla ricerca sul sistema immunitario possono ispirare idee per migliorare la trasmissione dei segnali e, soprattutto, rendere sicure le reti di scambio dei dati.

Questi nuovi sistemi stanno sempre



Questa tecnologia di mappatura consente alle aziende di individuare la posizione dei loro brevetti rispetto a quelli dei concorrenti, e mostra le aree dove esistono opportunità e rischi

più entrando a far parte di tecnologie orientate all'uomo, in cui usi, ergonomia e attese dell'utente sono integrate fin dalla fase di progettazione. Ciò porta con sé nuovi paradigmi, i cui fattori determinanti non sono più esclusivamente tecnologici ma anche sociali e cognitivi, e danno luogo ad adattamenti contestuali in termini culturali, geopolitici e ambientali. LA soluzione, unica e universale, è sostituita da MOLTE soluzioni su misura che dipendono dalle particolari specifiche, dal paese e dalla fonte energetica dominante. Ciò non significa determinarne l'uso, che anch'esso varia da un posto all'altro.

Nei campi dell'energia e dei trasporti, questi grandi cambiamenti obbligati stanno modificando il modo di fare ricerca, sviluppo e innovazione. Oggi si parla di soluzioni flessibili e riconfigurabili (per esempio, stabilendo in modo dinamico dei livelli di prezzo); soluzioni di controllo in tempo reale (per la ricarica dei veicoli elettrici); monitoraggio proattivo di apparecchiature e sistemi (in aeronautica); monitoraggio proattivo della qualità del servizio (via Internet); e ottimizzazione in tempo reale di produzione, trasmissione e immagazzinamento dell'energia (mediante veri sistemi a griglia intelligente per l'operatività delle reti).

STRUMENTI PER ORGANIZZARSI IN MODO NUOVO

In questi tempi di grandi cambiamenti, i familiari punti di riferimento sono spazzati via, anche nei settori cosiddetti «tradizionali». Strumenti più intelligenti sostituiscono quelli convenzionali, e sono condivisi, distribuiti, cooperativi e continuamente migliorati. Questa rivoluzione, in larga parte sostenuta dalla nuova epoca del digitale, ha un'intensità quanto meno paragonabile a quella di Internet di vent'anni fa. Le potenzialità dei nuovi strumenti, ampiamente descritti nel corpus dell'*open innovation*, definiscono relazioni nuove con i processi di fabbricazione (con la robotica e la cosiddetta «cobotica», la collaborazione tra robot ed esseri umani), una mediazione degli scambi e una nuova ergonomia sociale (attraverso reti sociali collaborative), e nuovi processi di analisi e supervisione (con le soluzioni di *data screening* e *data mining*). Questi strumenti, che hanno cominciato a cambiare l'organizzazione delle aziende e i loro rapporti con i mercati, sono in grado anche di produrre tempestive e dirompenti linee guida sulla competitività attuale e futura. E andranno a completare l'arsenale di strumenti già in uso per captare i segnali emergenti e i relativi scenari: in altre parole, per elaborare le strategie.

Oggi, noi raccogliamo – o catturiamo – questi tenui segnali in vari modi: analogicamente, digitalmente, o attraverso la conoscenza collettiva.

Il metodo analogico comporta la costituzione e lo sviluppo di rapporti di *partnership* aperti con università, enti di ricerca e, più in generale, con tutti i portatori di

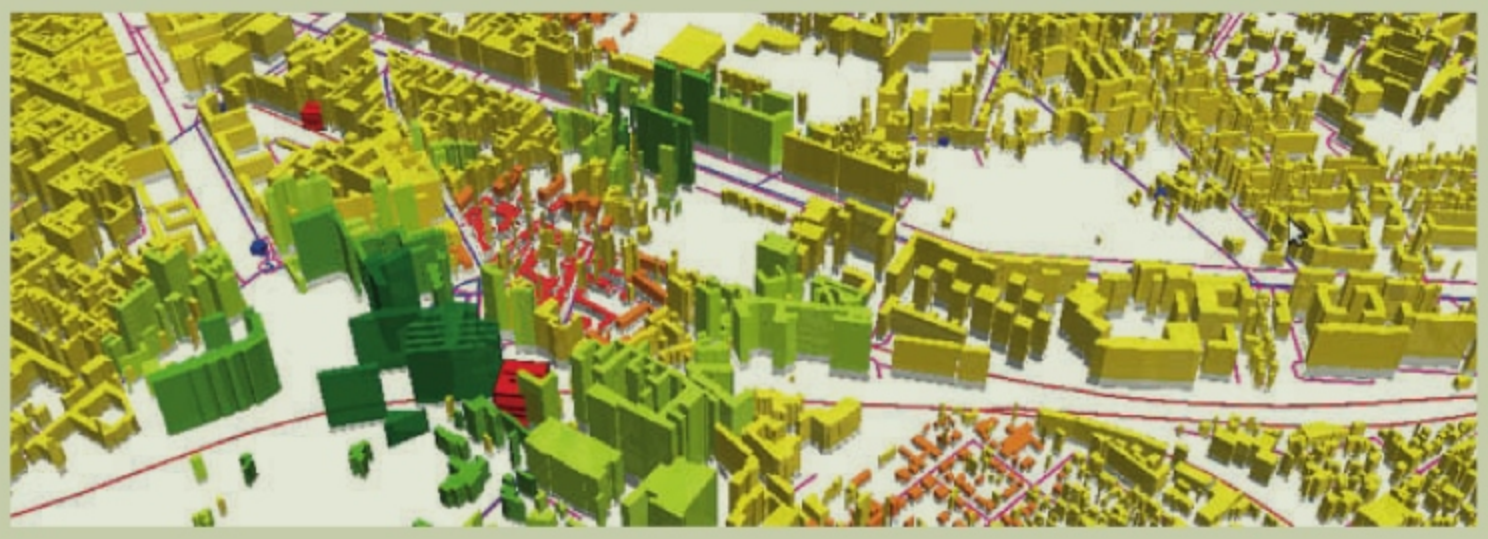
A sinistra: CNRS-DAE 2004. A destra: FiST s.a.

ALSTOM

SIMULAZIONE

Modellare la città

La CoSMo Company è una start-up francese fondata nel 2010 che fornisce strumenti per modellistica e simulazione di sistemi complessi dinamici ed eterogenei multi-scala. Con sedi a Lione e San Francisco, l'azienda sviluppa software dedicato per i settori della pianificazione energetica e urbana. Nell'ottobre 2013, ha prodotto un modello scalabile della città di Versailles che integrava contemporaneamente i fattori relativi a trasporti, sviluppo del territorio e sviluppo immobiliare. Lo scopo era prevedere l'impatto delle scelte pubbliche sulla qualità della vita in città e la desiderabilità dei suoi vari quartieri nei successivi 20 anni. Nel dicembre 2013, il modello sviluppato per Versailles è stato applicato a San Francisco. Utilizzando lo stesso tipo di dati, estremamente vari e dettagliati, su scala di quartiere, la città ha potuto confrontare diversi scenari di impatto delle scelte pubbliche.



Impatto a 20 anni delle scelte pubbliche sulla qualità della vita a Versailles: non sempre i cambiamenti avvengono dove ci si attendeva. Negativi: in rosso; positivi: in verde

interessi entro grandi ecosistemi innovativi. Questi spazi, in cui ricercatori e produttori condividono idee e presentano concetti, stimolano l'esplorazione scientifica e illuminano i problemi della produzione industriale a ogni livello di maturità tecnologica. Se mantenuti nel tempo, questo incrocio di prospettive e questo dialogo arricchiscono i rapporti e producono nuove idee, a volte fino ad accelerare la comparsa di interi nuovi campi di ricerca scientifica.

Il metodo digitale si avvale della ricchezza di dati disponibile oggi (sugli utenti, i loro schemi d'uso, i loro apparecchi, ecc.) per estrarre, con processi rapidi e rilevanti, rappresentazioni pertinenti dei dati relativi ai temi emergenti. È una tecnica che apre ovviamente la strada a nuovi approcci in termini di *intelligence* economica, consentendo alle organizzazioni di rispondere più velocemente nell'analisi strategica e nei processi decisionali.

Il terzo metodo è quello dell'intelligenza collettiva, un ibrido che combina il meglio degli altri due. È d'aiuto nel costituire comunità fisiche che affrontino problemi strategici, assistendole mediante contenuti digitali. Alstom, per esempio, ha utilizzato il concetto in un nuovo sistema basato su una rete sociale aziendale dedicata all'innovazione tecnologica. In esso si associano in comunità utenti fisici e utenti virtuali riconfigurabili, una sorta di *avatar* capaci di analizzare i temi di interesse per tali comunità ed estrarne richieste i cui risultati tornano ad alimentare la discussione. Il risultato è la creazione di un insieme dinamico e del tutto unico di insiemi di conoscenze, che può sia dare una rappresentazione preliminare di questi deboli segnali sia permettere la formulazione di scenari originali con cui affrontare questioni strategiche.

IMPADRONIRSI DI NUOVE ABILITÀ

Più avanti, rispondere alle sfide future nei campi dell'energia e dei trasporti non dipenderà solo dal progresso tecnologico ma anche, e ancor più, dalla nuova capacità di analisi, previsione e progettazione delle architetture del futuro (sistemi di sistemi), tenendo conto fin dal primo inizio di una complessità accresciuta da elementi sociologici e organizzativi.

In un tale contesto, la simulazione di sistemi complessi (*si veda l'esempio della Cosmo Company nel riquadro qui sopra*) e l'uso di «giochi seri» avranno un ruolo chiave nel definire i prodotti futuri e comporteranno tecniche di marketing totalmente ripensate e più flessibili, i grado di integrare le aspettative degli utenti a partire da fasi ancor più precoci. Questi nuovi – e ancora imprecisati – sistemi dovranno essere abbastanza adattabili e modificabili perché il cliente possa farli propri, arrivando a prodotti «co-sviluppati». Questa tendenza generale, guidata – fra l'altro – da un pensiero progettuale che reintroduce una certa misura di astrazione nel progetto dei nuovi prodotti traendo ispirazione dai desideri degli utenti, è una nuova forma di creatività collaborativa.

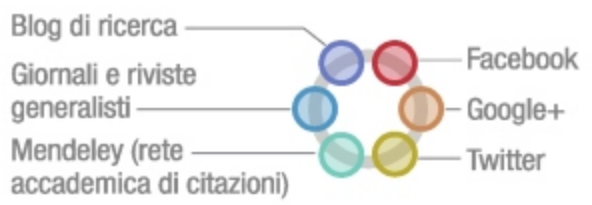
La rivoluzione digitale, per concludere, porta con sé nuovi elementi che avranno un impatto sulle aziende: internamente, cambiando il modo in cui si svolgono processi e scambi, e all'esterno, ove i prodotti saranno sostituiti da soluzioni. La materia prima verrà dai giacimenti di dati (*i big data*), e il vantaggio competitivo verrà dalla capacità di elaborarli ed estrarne gli andamenti significativi. Questa nuova e vitale risorsa spingerà altri portatori di interessi in altre tecnologie digitali a porsi come concorrenti in mercati che prima erano le roccheforti dell'industria più tradizionale. ■

COSMO COMPANY / ESRI

Discussioni sugli articoli più importanti

I 200 articoli pubblicati su riviste scientifiche e di cui si è più parlato nel 2014 sono mostrati qui accanto (*anelli grigi*, *molti sovrapposti*). I primi cinque sono numerati. Anelli più grandi indicano più menzioni.

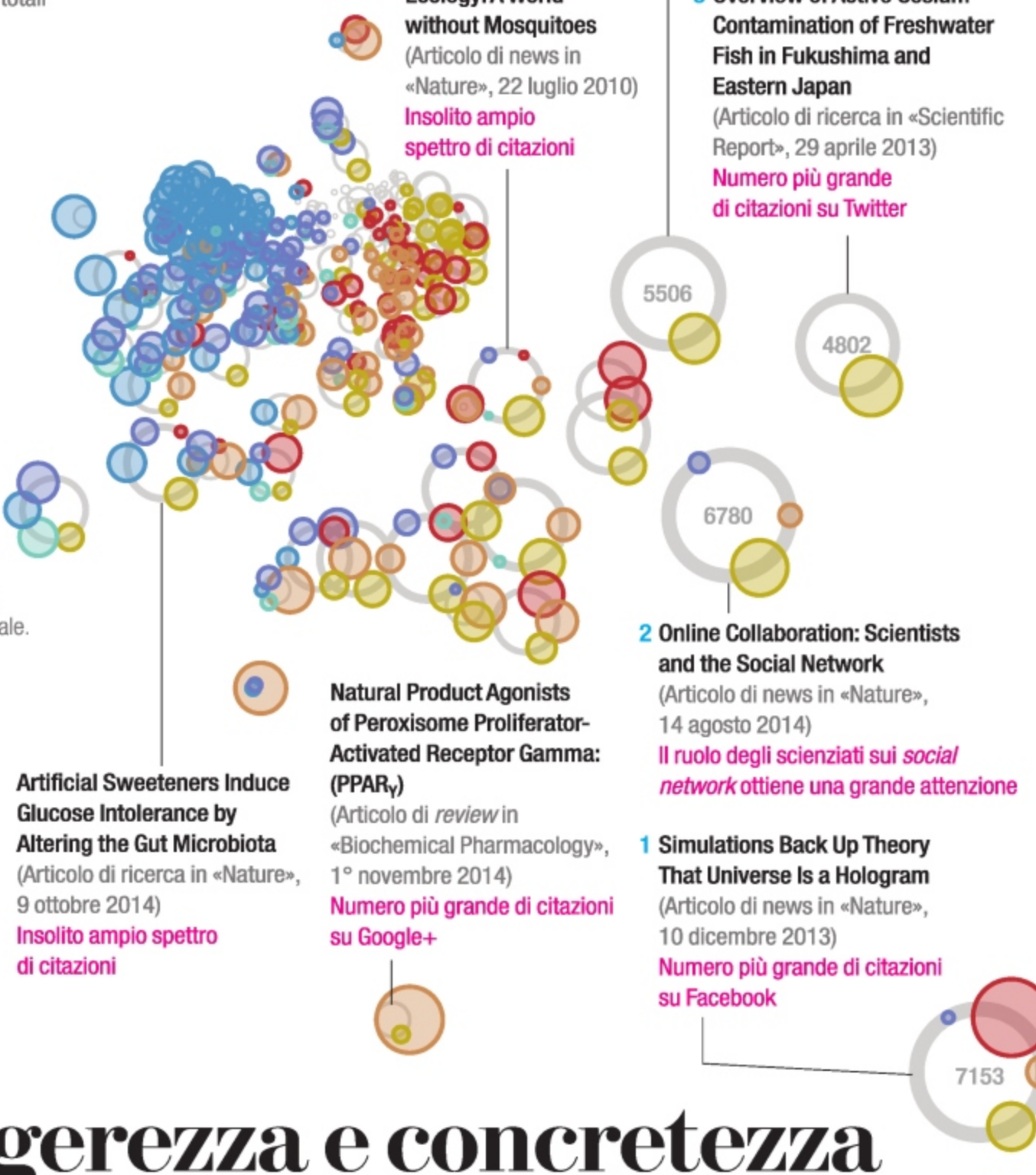
Gli articoli discussi di più in canali accademici e di news digitali hanno colori blu; quelli più discussi nei *social media* hanno colori rossi, arancione e giallo. Sono illustrati 6 di 14 canali rilevanti.



Articoli con mix simili di citazioni si raggruppano insieme e respingono altri con mix molto diversi; le anomalie hanno schemi bizzarri di citazioni, spesso estremamente elevate in un canale e basse in un altro.

La dimensione dei cerchi colorati (canali) è una misura del numero di citazioni superiore alla media di quel canale.

** Da fine ottobre 2013 a fine ottobre 2014*



Leggerezza e concretezza

Twitter, mezzi di comunicazione generalisti e blog accademici si concentrano su argomenti scientifici assai differenti

Ogni giorno nel mondo sono pubblicati centinaia di ricerche scientifiche. Ma quali sono le più discusse, e in quali circoli di persone? Per scoprirlo la Altmetric, una società di Londra, ha tracciato la frequenza con cui le ricerche erano citate in 14 canali digitali, da quelli seri (5000 blog di ricerca e Mendeley, rete accademica di citazioni) a quelli di tendenza (Twitter e Facebook) a tutti quelli tra queste due tipologie (inclusi 1000 canali di news).

Altmetric ha poi immesso i dati in un algoritmo che ha restituito punteggi; qui sopra sono mostrati i primi 200 articoli (*grafico al centro*). I risultati rivelano una divisione: gli studi più discussi nei canali più seri (*cerchi in blu, a sinistra nella pagina*) sono differenti da quelli discussi maggiormente sui social network (*in rosso, arancione e giallo, a destra nella pagina*).

Argomenti con punteggio elevato su siti accademici includono ricerche condotte in modo sbagliato, cellule umane, il funzionamento del cervello e progressi in ambito medico. I *social media* hanno preferito studi su errori scientifici, sistema solare e universo, salute.

Mark Fischetti

Grafica di Jan Willem Tulp; fonte: Altmetric

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Tris triviale

Gli sguardi glaciali di un essere umano e di un felino sono concentrati sullo schermo del computer, dove simboli cabalistici compaiono e scompaiono letteralmente alla velocità della luce. «Ehi, voi due: che cosa fate chiusi in casa in una così bella giornata?».

Il grugnito proveniente da Rudy e il movimento della coda di Gaetanagnesi dissuaderebbero chiunque dal continuare l'amabile conversazione, ma Doc confida che anni di convivenza possano garantirgli ancora qualche grado di immunità.

«Interessante coppia di risposte non verbali... Penso che allora andrò da solo verificare la temperatura delle birre del frigo. E forse potrei anche esaminare lo stato di salute dei gamberetti che intendevo usare per l'aperitivo...».

Entrando, ad Alice appare la medesima situazione di stallo per quanto riguarda Rudy e Gaetanagnesi, completata però da un Doc immobile dietro di loro, con uno sguardo stupito e vagamente terrorizzato.

«State giocando alle belle statuine?».

«Treccia, siamo in emergenza», sibila Doc in un fiato.

«Che cos'è successo? Ci sta piovendo addosso un asteroide?».

«Peggio. Ho detto "birra" e "gamberetti" nella stessa frase, e nessuno di questi due si è mosso. Sai se esiste la possibilità di possessione demoniaca di umani e felini da parte di un computer?».

«Vale anche la narrativa o solo la banale realtà? Nel primo caso ci ha già pensato Charles Stross, e non si può dire che lo abbia fatto male. Se vuoi posso prestarti qualche libro della "Laundry", la "Lavanderia"; si tratta di un'agenzia segreta che...».

«Alice, per favore. Ti ho appena detto che si tratta di un'emergenza. Io non riesco a distogliere questi due dal computer, e sì che nessuno dei due ha mai presentato sintomi evidenti di dipendenza da dispositivi elettronici. Per non parlare del fatto che l'ora di cena si sta avvicinando pericolosamente, e...».

«Miao», dice Gaetanagnesi.

«Vero, esimia collega. Incredibile», conferma pacato il dottor D'Alembert.

Un flebile sospiro di sollievo viene emesso in simultanea dai petti di Piotr e Alice.

«Alla buon'ora – dice Doc – siete finalmente usciti dallo stato di ipnotismo indotto dallo schermo? Avreste la compiacenza di dirci che cosa c'era di tanto interessante, in quei *pixel*?».

«Nulla di grave, tranquilli. Dovrei fidarmi di più di me stesso, tutto qui. Ho fatto un conto, non mi convinceva; ho scritto un programmino, e continuava a non convincermi...».

«Ti ha convinto la gatta, alla fine? Era un problema così astruso e incomprensibile da richiedere la sovrumana saggezza felina?».

«No, in realtà era di una semplicità incredibile, almeno per quanto riguarda l'esposizione. Penso di poterlo spiegare addirittura a te, Doc».

Prima che Piotr riesca a elaborare una veloce *exit-strategy*, la voce di Alice dimostra per l'ennesima volta la superiorità del sesso femminile nell'evitare i pericoli.

«Bene ragazzi, mi pare che queste siano cose da uomini, inadatte a delle signore. Io e Gaetanagnesi togliamo il disturbo e ci apprestiamo a diventare "all'opre femminili intente", come diceva Agamennone per bocca di Vincenzo Monti».

La velocità con la quale si dileguano sia Alice sia Gaetanagnesi, a ulteriore conferma che quella della presunta debolezza del sesso femminile è una panzana colossale, è degna del Piè Veloce Achille.

«Devi riconoscere, Doc – sorride Rudy mentre carica la pipa – che Alice si è eclissata in maniera ammirevole, con tanto di dotta citazione. Come non ammirarla?».

«Ammirarla? La perfida mi ha incastrato anche questa volta! E, se vogliamo essere pignoli, la citazione l'ha pure sbagliata... è la Silvia di Leopardi che è all'opre femminile intenta... la Criseide del Monti si doveva accontentare d'essere intenta "all'opre delle spole". Ecco».

«Bravo, hai superato l'esame di lettere classiche e moderne.

Illustrazione di Stefano Fabbri

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di marzo e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Rudy ha scritto un programma per far giocare al computer partite casuali di filetto. Quale sarà il risultato più frequente?

IL PROBLEMA DI GENNAIO

Nel numero scorso si discuteva sulla massima dimensione di una fetta «ortodossa» di torta, intendendo con questa definizione una fetta che fosse propriamente un settore circolare con angolo acuto ricavato da una torta perfettamente circolare.

La golosità di Doc, comunque, aveva aggirato il vincolo sottinteso da ogni pasticciere che si rispetti, ovvero che la fetta-settore circolare fosse un settore tratto dal cerchio della torta stessa.

Così, supponendo che la nostra torta abbia raggio unitario, e detto α l'angolo sotteso dal settore circolare, l'area A della fetta di torta tagliata da Doc sarà $A(\alpha) = 2\alpha\cos^2(\alpha/2)$.

La funzione è facilmente tabulabile nell'intervallo $[0,\pi]$, e mostra un massimo evidente: derivando, si vede che il punto in cui la derivata si annulla è quello corrispondente a $\tan(\alpha/2) = 1/\alpha$, e da qui si giunge al valore cercato dell'angolo ottimale, che vale $\alpha \approx 1{,}306542$ rad $\approx 74° 51' 34"$.

Ossia, la «fetta ortodossa ottimale» comprende un po' più della metà (per la precisione, il 51,77 per cento) della torta.

Adesso vediamo come te la cavi in matematica. E guarda che la mia domandina è semplice sul serio. E il fatto che Alice sia uscita mi permette di portelo nel modo più facile possibile».

«Ho capito. Se comincio ad annoiarmi mi basterà gridare "probabilità!" e ho la certezza che la furia trecciuta scenderà come Febo pronta a trafiggerti, o perlomeno a spianarti la testa con una padella».

«Piantala, adesso. Ascolta: hai presente il gioco che tu chiami "Tris", qualcuno chiama "Tria", io chiamo "Filetto" e tutti gli anglofoni chiamano "Tic-Tac-Toe"?».

«Certo. La mia passione tra i quattro e i sei anni. Da allora non ho più perso una partita».

«E neanche vinte, vero?».

«Beh, se si escludono le prime partite con i nipotini di tre anni ai quali ho insegnato io a giocare, no. Sempre pari. Non è difficile, pareggiare».

«Ecco, questo era esattamente lo scopo del mio calcolo. Il programmino che ho scritto per il computer gioca un gran bel numero di partite casuali (nel senso che le mosse sono sorteggiate senza alcun tipo di strategia); supponendo che sia presente anche Alice...».

«Meglio di no: rischi grosso già alla parola "casuale"».

«Appunto per questo mi limito a supporlo: supponendo, dicevo, che tu e lei doveste scommettere sul risultato più frequente di queste partite casuali, su chi scommetteresti, tu? Sul primo giocatore, sul secondo giocatore o sulla patta?».

«Uh, capisco. Se i giocatori hanno una strategia (e non ci vuole molto ad averla), è elementare scommettere sulla patta, ma se giocano casualmente...».

«Visto che sono riuscito a interessarti?».

«Non sperarci. Vista la fine dell'emergenza, ho intenzione di ritirarmi in cucina con le due femmine di casa e risolvere assieme a loro il problema di rendere il numero delle birre e quello dei gamberetti primi rispetto a uno. E quell'uno sarò io...».

Un nuovo presente, passato e futuro

La rinascita del tempo
di Lee Smolin
Einaudi, Torino, 2014, pp. 298 (euro 32,00)

"Per noi, fisici di fede, la separazione tra passato, presente e futuro ha solo il significato di un'illusione, per quanto tenace». Sono parole di Albert Einstein, scritte in occasione della morte dell'amico Michele Besso, che scomparve poche settimane prima del padre della relatività, e diventate famose perché sintetizzano bene la sorte a cui è andato incontro il tempo con lo sviluppo della fisica nel XX secolo. Proprio il percorso che ricostruisce in modo illuminante Lee Smolin nella prima parte di questo libro, intitolata *Peso: l'espulsione del tempo*. Da Galileo a Newton, fino a Einstein, la scoperta di come funziona la natura è avvenuta grazie all'impiego massiccio della matematica e a un approccio - Smolin lo definisce «fare fisica in una scatola» – che prova a ridurre la complessità della realtà, isola un sottosistema da studiare, riducendo le variabili in gioco e focalizzandosi su singoli oggetti o particelle idealizzate. Per Smolin questo approccio, quello che lo convinse a dedicarsi alla fisica, è come un surrogato del trascendente: una perfezione estranea a questo mondo che ci aiuta a capire come vanno le cose. Certo, con risultati strabilianti, che ci hanno regalato teorie eleganti e portentose. Ma in tutto questo a farne le spese è il tempo.

Nel paradigma newtoniano isoliamo un sistema dal resto dell'universo e lo studiamo a partire da alcune condizioni iniziali, osservandone poi il comportamento sotto l'effetto di leggi del movimento, che sono atemporali perché non cambiano con il passare del tempo. È un po' come far girare un programma con cui, più che trattare una relazione di causa/effetto nel tempo, abbiamo un output generato per semplice derivazione logica a partire da un input. La meccanica newtoniana, come la relatività generale o la meccanica quantistica sono inoltre tutte reversibili rispetto al tempo, non cambiano anche se invertiamo il passato con il futuro. E il principio di relatività introdotto da Einstein fa decadere l'idea che esistano due eventi simultanei in senso assoluto, che esista un «adesso» oggettivo, facendo sgretolare la realtà del tempo. Anche gli sviluppi dell'odierna cosmologia quantistica, che prova a coniugare relatività e fisica dei quanti, non fanno che confermare che il tempo è una pura e semplice illusione.

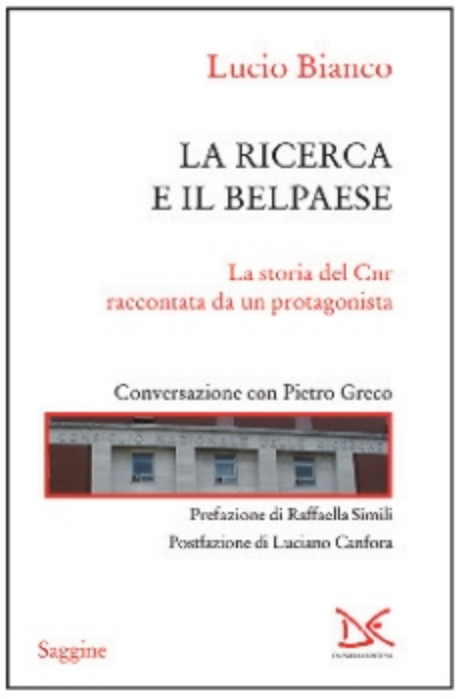
Smolin è un fertile scrittore di scienza, noto tra l'altro anche per un libro critico sulla teoria delle stringhe, ma soprattutto uno dei protagonisti della fisica teorica degli ultimi decenni, padre, insieme a Carlo Rovelli, della gravità quantistica a loop, una teoria che cerca di unificare relatività e teoria dei quanti. Dunque Smolin conosce bene lo stato dell'arte della fisica teorica, e l'intento di questo libro è persuadere i colleghi e chi si interessa di scienza che per compiere passi avanti nella cosmologia e nella fisica fondamentale dobbiamo riconoscere la realtà del tempo.

Nella seconda parte del volume, dal titolo *Luce: la rinascita del tempo*, Smolin prova a gettare le fondamenta di una nuova cosmologia, partendo dall'ipotesi per cui le leggi di natura si evolvono nel tempo e che si debba reintrodurre un concetto di tempo globale privilegiato, senza violare la relatività ma riformulandola. Probabilmente le idee di Smolin suoneranno altamente speculative a gran parte dei suoi colleghi. Uno dei messaggi più chiari però sembra diretto a coloro che vedono nella matematica la spiegazione ultima della realtà. Smolin sottolinea invece che logica e matematica colgono solo alcuni aspetti della natura, che non sono le equazioni a generare la realtà, rispondendo a Stephen Hawking, che in *Dal big bang ai buchi neri. Breve storia del tempo* si chiedeva: «Che cos'è che insuffla il fuoco nelle equazioni, dando loro un universo da descrivere?».

Come nei suoi libri precedenti, *La vita del cosmo* e *L'universo senza stringhe*, Smolin si dimostra capace di coinvolgere i lettori fornendo loro un racconto chiaro della fisica contemporanea. Se nella seconda parte può diventare a tratti difficile seguire il suo percorso fino in fondo, tutto il libro è sorretto da una visione di ampio respiro: il fisico teorico si fa guidare dai principi filosofici di Leibniz, e nel finale indaga anche le ripercussioni sulle altre discipline, dall'economia alle neuroscienze, di un pensiero scientifico che sa fare i conti con il tempo.

Marco Motta

La politica della scienza in Italia vissuta da un protagonista



La ricerca e il Belpaese
di Lucio Bianco
Donzelli, Roma, 2014,
pp. 150 (euro 18,50)

Il Consiglio nazionale delle ricerche (CNR) è attivo da più di novant'anni, ha attraversato diverse fasi e differenti crisi. L'ultima, legata alla riforma voluta dall'allora ministro Letizia Moratti, ha avuto come protagonista Lucio Bianco, in qualità di presidente dell'ente e principale antagonista dei progetti del governo Berlusconi. E da protagonista Bianco racconta non solo i suoi anni da presidente del CNR ma anche tutta la storia dell'ente, da Volterra, il primo presidente, antifascista e presto sostituito da Guglielmo Marconi, fino al mandato dello stesso Bianco, deciso da Luigi Berlinguer e prolungato da Ortensio Zecchino. Il libro è costruito per arrivare proprio al *climax* di quei mesi di scontro tra Bianco e Moratti, con quest'ultima che avrebbe dovuto commissariare il CNR ma fu fermata dal TAR (su ricorso di Bianco): una prospettiva di sicuro avvincente, ma certamente non obiettiva sul passato, remoto e prossimo, del CNR.
Essere una testimonianza in prima persona, stimolata dalle domande di Pietro Greco, è l'aspetto più interessante del testo: un documento da interpretare per capire lo sviluppo della politica della scienza in Italia, prendendo atto delle correnti che hanno influito su finanziamenti e ordinamenti istituzionali della ricerca. Le vicende recenti ricostruite da Bianco, in particolare le riforme che dagli anni novanta hanno toccato CNR e università, hanno avuto un impatto forte (non certo positivo) sulla scienza italiana, soprattutto perché nessun processo di cambiamento è mai giunto a regime né ha mai messo sul tavolo un aumento dei finanziamenti. Per quante belle siano state le parole dei promotori, nessuna riforma ha messo al centro lo sviluppo scientifico e culturale del paese.

Mauro Capocci

Quell'insospettabile dialogo tra scienza e magia

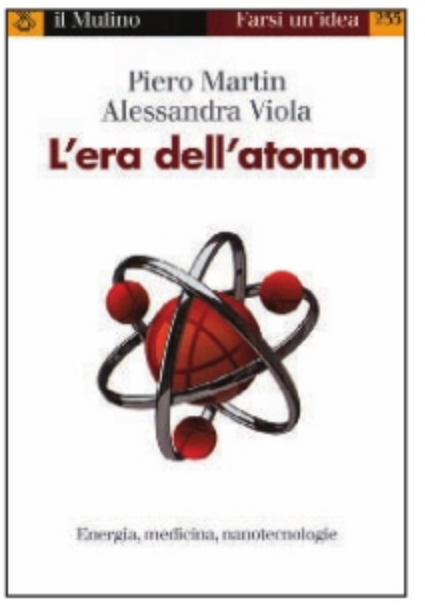
Galileo e Harry Potter
di Marco Ciardi
Carocci Editore, Roma, 2014,
pp. 132 (euro 13,00)

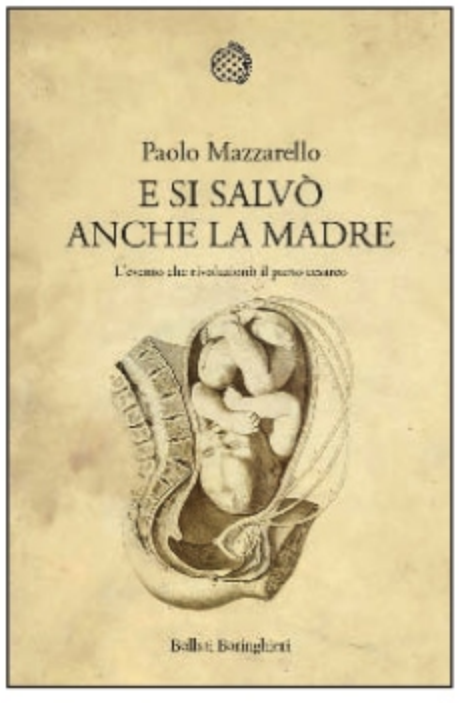
Scienza e magia: si tratta veramente di un ossimoro? C'è un punto d'incontro tra quello che è considerato il padre del metodo sperimentale e il maghetto tanto amato da generazioni di adolescenti e adulti, oppure Galileo e Harry Potter rappresentano due modi inconciliabili di guardare alla realtà, dagli esiti completamente opposti? La questione è meno banale di quel che sembra perché riguarda il problema della demarcazione tra scienza e pseudoscienza e, più in generale, della definizione stessa di scienza.
La lettura di libri *fantasy*, sostengono alcuni, può essere dannosa soprattutto in età infantile e adolescenziale perché indurrebbe a preferire il pensiero magico al ragionamento scientifico. Di tutt'altro parere è lo storico della scienza Marco Ciardi, autore di questo saggio agile e denso, che parte proprio dalla constatazione dell'importanza, per la scienza, della creatività e dell'immaginazione, alla base di ogni grande innovazione scientifica e senza dubbio stimolate dal contatto con il fantastico. Lo dimostrano le preferenze letterarie e artistiche di molti grandi scienziati – Galileo *in primis* – ma anche lo stretto legame, incredibile agli occhi dell'uomo contemporaneo, esistente tra discipline come l'alchimia, l'astrologia, le dottrine ermetiche e la scienza moderna, staccatasi da queste solo dopo il Settecento.
Non vi è quindi alcuna ragione di temere che il magico o il fantastico possano rivelarsi un ostacolo per il consolidarsi del pensiero scientifico: secoli di storia della scienza hanno, infatti, dimostrato che non c'è molla più efficiente per il desiderio di capire che lo stupore e la curiosità. Si può quindi essere dalla parte di Harry Potter senza rinnegare Galileo, anzi seguendone le orme.

Anna Rita Longo

L'importanza del nostro amico atomo

Nella classifica bizzarra e insensata dei nemici dell'umanità stilata in base a concetti, fenomeni e scoperte scientifiche, l'atomo occupa un posto di rilievo. Forse è superato solo dalla chimica, complice il declino dell'energia atomica successivo al disastro di Chernobyl del 1986, con un richiamo, un po' come avviene per le vaccinazioni, prodotto dall'incidente di Fukushima nel 2011.
Eppure la storia dell'atomo è nobile e importante come poche altre in ambito scientifico e filosofico. Basta ricordare il filosofo greco Democrito, il quale nel V secolo a. C. formulò la prima teoria della natura basata sull'atomo. Per non parlare delle applicazioni tecnologiche, dalla medicina alla telecomunicazioni alle nanotecnologie, come ricordano Piero Martin, docente di fisica sperimentale all'Università di Padova, e la giornalista scientifica Alessandra Viola in *L'era dell'atomo* (Il Mulino, 2014, pp. 138, euro 11,00). Il libro guarda all'atomo senza pregiudizi, ripercorrendo la storia di quella che era ritenuta l'unità ultima e indivisibile della materia per arrivare agli sviluppi tecnologici recenti basati sull'atomo. E c'è anche spazio per i sogni per il futuro: per esempio l'energia da fusione nucleare, pulita e illimitata. (*gs*)





E si salvò anche la madre
di Paolo Mazzarello
Bollati Boringhieri, Torino, 2015,
pp. 200 (euro 16,00)

L'innovazione italiana del parto cesareo

Un secolo e mezzo fa, un parto cesareo era cosa rara. Si usava per salvare un feto se per la madre non c'era più nulla da fare. Ma spesso, nei casi in cui malformazioni fisiche e altre malattie non permettevano un parto naturale e mettevano a rischio la donna e il feto, quest'ultimo veniva distrutto con la cosiddetta embriotomia, o si tentava di indurre il parto in anticipo forando il sacco amniotico: anche questa opzione non era sicura per il nascituro. Quando si praticava il cesareo, era la madre a essere esposta a molti pericoli, soprattutto per le possibili infezioni a cui la ferita esponeva la paziente. Era la febbre puerperale il nemico più temuto, dato che le misure antisettiche erano ancora poco efficaci, e spesso fatale fino all'avvento degli antibiotici. Il cesareo era quindi una scelta medica, che significava quasi certamente la morte della madre.

Mazzarello racconta la storia di un'innovazione che ha cambiato per sempre l'approccio nei confronti di questo intervento chirurgico. Di fronte a una donna con gravi problemi che rendevano il canale del parto inadatto, nel 1876 Edoardo Porro intrecciò una serie di innovazioni dell'epoca su fisiologia dell'apparato riproduttivo e tecniche operatorie. Il risultato fu brillante: un'operazione più invasiva in cui l'utero era rimosso insieme all'estrazione del feto, riducendo l'ampiezza della ferita, subito chiusa e medicata, e ottenendo un drastico incremento nella sopravvivenza di donne e neonati. La tecnica da Pavia si diffuse in tutta Europa: il nuovo intervento aveva tassi di successo che lo rendevano un'opzione praticabile, alternativa all'embriotomia o ai tentativi di parto prematuro.

Mazzarello, con una miscela di capacità di affabulazione e ricostruzione storica, riunisce tutti i fili che portarono Porro a immaginare e mettere in pratica l'intervento nuovo su Giulia Cavallini nel maggio 1876. L'esito fausto, nessuna febbre puerperale, madre e figlia in buona salute, non evitò però le polemiche. Vi erano gli scrupoli morali: l'asportazione dell'utero e delle ovaie impediva ulteriori gravidanze. Il cattolico (ma garibaldino) Porro chiese a un teologo di dirimere la questione, ottenendo un responso positivo. Ma vi erano anche le invidie dei colleghi, che non vollero riconoscere l'ampia applicabilità dell'intervento. Portandoci nelle corsie chirurgiche e ostetriche dell'Ottocento, il libro rende giustizia a Porro, ma soprattutto alla grande capacità che la scienza medica ha dimostrato negli ultimi due secoli di migliorare il benessere degli individui: una vera rivoluzione di cui ancora godiamo i frutti.

Mauro Capocci

Le cose di casa
di Vittorio Marchis
Codice Edizioni, Torino, 2014
pp. 192 (euro 25,00)

Storie di oggetti che usiamo ogni giorno

Quasi nessuno sa chi sia John Harington, eppure la sua è una di quelle storie importanti per l'umanità, o almeno per la nostra comodità quotidiana. Vissuto alla corte di Elizabeth I, Harington installò sul finire del XVI secolo la sua invenzione nella villa di campagna della regina vicino a Bath, nel Somerset. Pare che la sovrana, pur apprezzandone l'ingegnosità, non la ritenesse particolarmente importante. Il primo sciacquone moderno per il bagno, quindi, non esordì sotto i migliori auspici. Pur dotato di un sistema a vite che impediva ai cattivi odori di diffondersi nella stanza che lo ospitava, il maggior vantaggio - quello di non dover disporre degli escrementi - era comunque un obbligo che spettava alla servitù, non certo alla regina d'Inghilterra! Harington, quindi, è rimasto lungamente nel dimenticatoio della storia. Certo, la sua invenzione del *water closet* mancava del sifone, componente cruciale in tutti i bagni moderni, ma il suo sistema ad acqua per lo smaltimento degli escrementi domestici ha conquistato il mondo e oggi sarebbe impensabile vivere senza.

Ma non fatevi ingannare dall'affascinante aneddotica di cui lo sciacquone è solo un esempio. L'ultimo libro di Vittorio Marchis, storico della tecnica e delle macchine, famoso per le sue «autopsie» di elettrodomestici, è questo, ma molto di più. È un tentativo, piccolo e necessariamente incompleto, ma importante di rendere giustizia agli «oggetti di scena» che caratterizzano il «palcoscenico» della nostra vita quotidiana. Una vita che le tecnologie che ogni giorno usiamo sovrappensiero hanno contribuito in maniera determinante a rendere più semplice e pratica.

Marchis ci accompagna in una visita a una casa che «ideale non è», a differenza di quelle immaginate dagli architetti. Incontriamo così una tecnologia antica che nell'Ottocento Linus Yale e Alexandre Fichet hanno reso moderna: la serratura e la chiave; oppure quella a forte marchio italiano della caffettiera, attraverso lo sviluppo della napoletana e, poco dopo, dell'invenzione della moka di Alfonso Bialetti. Le storie delle cose di casa si intrecciano con lo sviluppo industriale, hanno un ruolo nel progresso tecnologico (o ne sono una conseguenza), tracimano nell'immaginario collettivo attraverso la pubblicità nel Novecento. Oggi si stanno sempre più smaterializzando, diventano servizi digitali, sono sempre meno «cose» concrete, basti pensare a quello che c'è dentro a uno *smartphone* o a come gli elettrodomestici tutti stiano diventando «*smart*». Eppure continuano a caratterizzare il «focolare» delle nostre abitazioni, multi o monofamiliari che siano. E continuano a raccontare un po' di chi siamo.

Marco Boscolo

Scienza e arte, dal principio

A Novara, una mostra affronta il tema delle origini intessendo un dialogo tra mondo della scienza e quello dell'arte

Da bambini, in una fase che abbiamo attraversato tutti, ci continuavamo a chiedere il perché delle cose, non accontentandoci mai della prima risposta: c'era sempre una ragione ulteriore, meno evidente, da cercare e interrogare. Non c'è forse molta differenza con la curiosità che gli scienziati mostrano nei confronti della natura che interrogano con i loro esperimenti e analizzano nelle loro riflessioni. E chissà che, sotto il profilo delle motivazioni, anche la mano degli artisti non si sia mossa per cercare con gli strumenti della bellezza di dare risposte alle stesse domande sull'origine e le motivazioni di quello che ci circonda.

Con uno spirito di questo tipo, i curatori della mostra che si può visitare a Novara hanno intessuto un dialogo continuo tra scienza e arte attraverso i secoli, in un continuo sondare l'infinitamente grande, come l'infinitamente piccolo, alla ricerca dell'origine dell'universo, della formazione della Terra e della Luna, ma anche della nascita della vita sul nostro pianeta.

Gli ambienti sono sette, e ognuno è dedicato a una diversa disciplina: astronomia e astrofisica, geologia, biologia, antropologia, linguistica, neuroscienze ed estetica. La storia inizia 14 miliardi di anni fa, con il big bang, l'origine dell'universo come lo conosciamo oggi. Con un salto di una decina di miliardi di anni si passa alla formazione del nostro Sole e dei suoi pianeti, tra cui la Terra, dove le prime molecole organiche sono apparse 3,5 miliardi di anni fa. Se la vita si è differenziata in «infinite forme e bellissime», come scriveva Charles Darwin, *Homo sapiens* si caratterizza per essere l'unica che si sia voltata indietro a cercare le proprie origini e la propria storia. O per guardare dentro di sé, sempre acquisendo conoscenze che può trasmettere perché ha sviluppato un linguaggio che permette di manipolare concetti complessi e astratti.

Per questo viaggio, accanto, tra gli altri, ai disegni originali delle lune di Galileo Galilei, alla prima edizione dei *Principia Mathematica* di Isaac Newton o rari esemplari di meteorite, troviamo opere di giganti dell'arte come Lucio Fontana, Guercino e Alberto Burri, in un dialogo che riverbera, assieme alle domande che l'hanno mosso, nel fascino plurisecolare del Broletto.

Marco Boscolo

Non solo scienziati. Alcune delle opere esposte alla mostra *In principio*, a Novara. In alto, globo celeste del 1696 di Vincenzo Coronelli. Accanto a sinistra, *Catrame* (1950), opera di Alberto Burri; a destra, *Testimone* (2009), opera di Mimmo Paladino in pietra di tufo. Sotto, ricostruzione delle pitture rupestri scoperte nella grotta di Lascaux.

Dove & quando:

In principio
Dalla nascita dell'universo all'origine dell'arte
fino al 6 aprile
Complesso monumentale del Broletto, Novara
www.mostrainprincipio.it

Cortesia Biblioteca Nazionale Centrale, Firenze (*globo celeste*); cortesia Galleria Tornabuoni Arte (*Alberto Burri*); cortesia Mimmo Paladino (*pietra di tufo*); Gianni Dagli Orti/Corbis (*Lascaux*)

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

La scienza e i nostalgici ingrati

Contro il mito del ritorno alla natura ci sono ottimi argomenti, come l'anestesia

Paleodiete, movimenti anti-vaccinazioni e anti-OGM, stili di vita alternativi e nostalgia per le epoche passate testimoniano la popolarità del mito che «naturale» sia sinonimo di «sano» e che tutto sommato si stava bene anche quando non c'era la tecnologia. Non è raro sentir chiedere che cosa abbia fatto la scienza per migliorare realmente la qualità della vita: certo, si dice, abbiamo telefonini più piccoli, ma viviamo davvero meglio? Essere anti-scienza è *trendy* e motivo di vanto; lo sa bene il mondo del marketing, che infatti spesso approfitta di queste mode per rifilare costosa paccottiglia che promette un ritorno alla natura che in realtà è del tutto sintetico.

La prossima volta che vi imbatterete nella domanda retorica di uno di questi paleosnob, provate a rispondere con una sola parola: anestesia. È facile dimenticare che per quasi tutta la storia dell'umanità gli interventi chirurgici furono praticati a paziente sveglio. C'erano solo bevande alcoliche e pozioni sedative e analgesiche. Dal IX secolo in poi si aggiunsero le cosiddette «spugne soporifere» (miscele di erbe narcotiche inalate), tuttavia la loro reale efficacia è dubbia, specialmente per gli interventi lunghi, e comunque la loro rapida scomparsa alla fine del XVII secolo indica che probabilmente si era persa via via l'arte della loro preparazione, perché ingredienti, dosi e metodi non erano stati documentati in modo rigoroso.

Sonno antidolore. Prima dello sviluppo dell'anestesia moderna, le operazioni chirurgiche erano fonte di indicibili sofferenze per i poveri pazienti, sottoposti di fatto a una vivisezione.

Unlisted Images/Corbis

Spesso, insomma, il paziente preferiva la morte alla vivisezione della chirurgia, ben descritta nel 1811 dalla scrittrice inglese Frances Fanny Burney, afflitta da un sospetto tumore al seno, che in Francia si sottopose a una doppia mastectomia senza anestesia: «Fui circondata all'improvviso da sette uomini e dalla mia infermiera... quando il tremendo acciaio mi fu conficcato nel petto, recidendo vene, arterie, carne e nervi... iniziai un grido che non s'interruppe per tutta la durata dell'incisione... la carne resisteva così fortemente che stancò la mano dell'operatore, che passò dalla destra alla sinistra... sentii il coltello colpire e graffiare le ossa del petto». L'intervento durò 20 interminabili minuti. Non stupisce che all'epoca la raccomandazione principale al chirurgo fosse di lavorare in fretta e con decisione. Burney, fra l'altro, visse per altri trent'anni dopo l'atroce esperienza.

Non tutti i pazienti dimostravano pari forza d'animo. Il celebre chirurgo londinese Robert Liston, noto come «la lama più veloce del West End», rincorse un paziente che era scappato dalla sala operatoria durante un intervento per rimuovergli un calcolo alla vescica e si era chiuso nella toilette; Liston sfondò la porta e terminò l'operazione nonostante le grida del poveretto. A un altro paziente amputò una gamba in due minuti e mezzo, ma nella foga gli recise anche i testicoli. La prima anestesia chirurgica moderna di successo arrivò soltanto nel 1846 dagli Stati Uniti, con l'uso dell'etere, e cambiò tutto. Liston fu il primo europeo ad adottarla.

Oggi siamo talmente abituati all'anestesia che è facile non rendersi conto di quanta sofferenza abbia eliminato: probabilmente i nostalgici che amerebbero vivere nel Medioevo tornerebbero al presente al primo dente da cavare. Se ci possono essere dubbi, spesso ragionevoli, sull'utilità di tanti altri risultati della scienza, non ce ne sono sull'anestesia. Nessuno si sogna di rifiutarla: i suoi benefici sono evidenti, e l'alternativa è terrificante. Ma la sua stessa efficacia spinge a darla per scontata, così uno dei più grandi successi scientifici non viene apprezzato proprio perché è un grande successo. Povera scienza: non gliene va bene una.

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie, OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello.*

Sostanze odorose

Come agiscono le molecole che attivano i recettori responsabili dell'olfatto

Se provate a tapparvi il naso mentre mangiate, vi accorgerete che il gusto di un cibo è la combinazione tra i sapori, che sentiamo in bocca, e gli odori, che percepiamo dal naso. E se pensate che riconosciamo solo cinque sapori fondamentali ma abbiamo almeno 400 tipi di recettori olfattivi capirete che spesso gli aromi sono più importanti dei sapori per caratterizzare un cibo. Una mela grattugiata è scarsamente distinguibile da una patata bollita schiacciata, se assaggiate entrambe a occhi chiusi e naso tappato.

La famiglia dei geni olfattivi è una delle più vaste dell'intero genoma umano, e le ragioni sono probabilmente da far risalire alle molteplici funzioni svolte dall'olfatto. È la sentinella che ispeziona i cibi prima di portarli alla bocca, ma ci può segnalare anche situazioni di pericolo come un odore di fumo. Il numero di recettori olfattivi è comunque molto più piccolo degli odori che possiamo percepire, e questo perché una molecola può stimolare più recettori, e ogni recettore a sua volta viene stimolato da molte molecole diverse. Le combinazioni quindi sono quasi illimitate.

Quando una molecola odorosa, od odorante, raggiunge un recettore olfattivo, attraverso le narici prima di mangiare, o attraverso la rinofaringe mentre mangiamo, innesca una cascata di segnali che giungono al cervello, dove è generata la percezione dell'odore. Affinché una molecola possa essere un potenziale odorante deve essere volatile, cioè deve essere abbastanza piccola e leggera da librarsi nell'aria e raggiungere i recettori. Molecole molto grandi e pesanti, come le proteine, non hanno odore perché non sono volatili. La maggior parte delle piccole molecole volatili sono odoranti, ma non tutte. Per esempio monossido di carbonio e anidride carbonica sono prive di odore. In più molecole diverse possono generare lo stesso odore, e molecole molto simili, addirittura immagini speculari l'una dell'altra, possono avere odori diversi.

Quando annusiamo un cibo percepiamo centinaia di molecole diverse, e sarebbe difficile, annusandole separatamente, riuscire a riconoscere l'aroma completo. Alcune spezie ed erbe aromatiche sono però eccezioni, dato che spesso solo poche molecole sono responsabili della maggior parte dell'aroma. Per esempio la molecola maggiormente responsabile dell'aroma della vaniglia è la vanillina, che in effetti molto spesso è usata pura per aromatizzare vari dolci. Oltre alla vanillina, la vaniglia contiene alcol vanillico, acido vanillico e più di altre 200 molecole che contribuiscono all'aroma completo. L'odore pungente e balsamico del timo (*Thymus vulgaris*) è dovuto principalmente a timolo, borneolo, geraniolo e linalolo. Quest'ultima molecola si trova in percentuali diverse in più di 200 specie vegetali ,ed è per questo che, se annusata pura, alcune persone la associano al basilico, altre al coriandolo, altre ancora alla cannella e così via.

Non meno importanti sono le molecole odoranti che si sviluppano durante la cottura. Un esempio clamoroso lo annusiamo ogni volta che mangiamo un panettone: le molecole responsabili del tipico aroma si formano solo in fase di cottura dalla reazione tra vanillina e oli essenziali degli agrumi che si trovano nell'impasto sotto forma di canditi o di scorze. Per completare l'aroma, tuttavia, servono anche molecole che si trovano nel burro come diacetile e acetoino.

A. Green/Corbis

Piacere intenso. L'aroma di cibi che ci piacciono possono anche essere composti in piccola parte da molecole con odori sgradevoli, come l'acido capronico nei formaggi.

Non pensiate che gli aromi dei cibi che ci piacciono siano assemblati solo da molecole dall'odore piacevole. Anche molecole con odori sgradevoli, se presenti in piccole quantità, possono essere importanti. Per esempio l'acido capronico è una molecola dall'odore sgradevole con note animali, di stalla e capra. Entra però nelle formulazioni di molti aromi perché in piccole quantità esalta le note di latte e formaggio e addirittura conferisce note di frutta matura come fragola, mora e ananas, mela.

Meglio della Terra

di René Heller

Le ricerche sull'esistenza di forme di vita in sistemi extrasolari si concentrano sempre più sulle cosiddette super-Terre: pianeti più grandi del nostro, ma più piccoli dei giganti gassosi e quindi potenzialmente rocciosi. Alcuni dei quali hanno caratteristiche che potrebbero renderli «superabitabili», ossia più adatti a ospitare la vita della Terra stessa.

Perché abbiamo il libero arbitrio

di Eddy Nahmias

Mostrando che a volte il cervello dà inizio a un'azione prima che ci rendiamo conto di aver deciso di compierla, le neuroscienze hanno riacceso il dibattito sull'esistenza del libero arbitrio. Recenti esperimenti di psicologia dimostrano però che anche il ragionamento cosciente e le intenzioni hanno un peso sulle nostre azioni.

Che gusto avrà il nostro Pinot nero?

di Kimberly A. Nicholas

L'aumento delle temperature nelle zone vinicole causato dal riscaldamento globale potrebbe alterare radicalmente il gusto dei vini. Poiché spostare le zone di produzione è costoso e non sempre funziona, scienziati e viticoltori sono alla ricerca di nuove strategie di adattamento per preservare sapori e profumi.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 98, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Supervisione editoriale: Daniela Hamaui

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Cinzia Sgheri, Ale Sordi (*grafico*), Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Paolo Bardelli (tel. 02 57494338, 335 6454332)
e-mail pbardelli@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Distribuzione per l'Italia
Gruppo Editoriale L'Espresso,
via Cristoforo Colombo 98, 00147 Roma.

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc,
00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.
Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - gennaio 2015

Copyright © 2015 by Le Scienze S.p.A.

ISSN0036-8083

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; *Executive editor*: Fred Guterl; *Managing Editor*: Ricki L. Rusting; *Board of Editors*: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong, David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John Matson

President Steven Inchcoombe;
Executive vice president: Michael Florek;
Vice president and associate publisher: Michael Voss;
Design Director, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Benedetta Antonielli: *Un volo impossibile*; Elena Bernacchi: *A caccia di fossili nella Via Lattea;* Mauro Capocci: *L'illusione dell'immunità;* Paolo Cocco: *La messinscena del ragno*; Valeria Gili: *Gli strani percorsi della corrente a getto*; Lorenzo Lilli: *Il mondo programmabile, La storia del dio della tempesta*; Michelle Nebiolo: *Il metodo scientifico a scuola*; Cristina Serra: *Il dolore che non passa;* Alfredo Tutino: *Le rondini di Fukushima.*

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
SOMEDIA S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail grandiclienti@somedia.it

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 7647 del 18/12/2013

Ron Miller (*Super-Terra*); Getty Images/Travis Rathbone/Trunk Archives (*vino*)

Le Scienze

edizione italiana di Scientific American

SPECIALE ABBONAMENTO

Ogni mese direttamente a casa tua le ultime frontiere della ricerca scientifica e tecnologica.

IN ESCLUSIVA, solo con l'abbonamento, ti assicuri la possibilità di consultare sul **nuovo sito www.lescienze.it** gli oltre **4.200 articoli** pubblicati dal 1968 ad oggi!

E, se vuoi, puoi decidere di **regalare l'abbonamento alle stesse condizioni!**

Fino al 38% di sconto

SCEGLI LA TUA OFFERTA!

DURATA	PREZZO DI COPERTINA	PREZZO PER TE	RISPARMIO
1 ANNO - 12 NUMERI	€~~54,00~~	**€39,00**	€15,00
2 ANNI - 24 NUMERI	€~~108,00~~	**€75,00**	€33,00
3 ANNI - 36 NUMERI	€~~162,00~~	**€99,00**	€63,00

Offerta valida solo per l'Italia

SCEGLI DI ABBONARTI!

- **È CONVENIENTE**
  Più aumenta la durata del tuo abbonamento, più aumenta il risparmio!
- **È COMODO**
  Riceverai Le Scienze ogni mese a casa tua senza alcun costo aggiuntivo e con il prezzo bloccato!
- **È FACILE**
  ✓ Collegati al sito www.ilmioabbonamento.it
  ✓ Chiama il n. 199.78.72.78* **(0864.25.62.66 per chi chiama da telefoni non abilitati o cellulari.)**
  ***Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa).**
  ✓ Compila, stacca e spedisci - anche via fax - la cartolina che trovi nella rivista

ROLEX
Awards for Enterprise

CHIUNQUE PUÒ CAMBIARE IL MONDO

Rolex è orgogliosa di premiare cinque intraprendenti giovani
i cui progetti avranno un profondo impatto sul mondo.
Per scoprire i vincitori dell'edizione 2014,
visita rolexawards.com.